

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МУРМАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**Кафедра строительства,
энергетики и транспорта**

Методические указания
к лабораторным работам студентов

по дисциплине: **Электрические системы и сети**

для направления подготовки (специальности)

13.03.02

код направления подготовки

«Электроэнергетика и электротехника». Профиль – «Электроснабжение»

наименование направления подготовки

Для всех форм обучения

код и наименование специальности, форма обучения

Мурманск

2021

Составил: Васильева Елена Витальевна, доцент кафедры строительства, электроэнергетики и транспорта Мурманского государственного технического университета

Методические указания рассмотрены и одобрены на заседании кафедры СЭиТ 01.07. 2021 г., протокол № 05

Методические указания составлены на основе ФГОС ВО по направлению подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», утвержденного приказом Минобрнауки РФ 03.09.2015 № 955, учебного плана в составе ОПОП по направлению подготовки/специальности 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», профиль «Электроснабжение».

Процесс изучения дисциплины «Электроэнергетические системы и сети» направлен на формирование элементов следующих компетенций в соответствии с ФГОС ВО:

ОПК-3. Способность использовать методы анализа и моделирования электрических цепей

ПК-6. Способность рассчитывать режимы работы объектов профессиональной деятельности

В результате изучения дисциплины студент должен:

Знать: структуру современных электрических сетей; требования предъявляемые к электрическим сетям; режимы работы современных электрических сетей; способы регулирования напряжения в электрических сетях.

Уметь: выполнять выбор оборудования для современных электрических сетей; составлять математические модели основных элементов современных электрических сетей; выполнять расчёт параметров математических моделей схем замещения основных элементов современных электрических сетей; выполнять расчёт режимов современных электрических сетей на основе составленных математических моделей; выполнять расчёт потерь мощностей в электрических сетях, выполнять механический расчет проводов и тросов ВЛ.

Владеть: анализом результатов, получаемых в результате расчёта режимов работы электрических сетей.

ОГЛАВЛЕНИЕ

1 .ВВЕДЕНИЕ	4
2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ	5
3. СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	36
4. ПРИЛОЖЕНИЯ	37

ВВЕДЕНИЕ

Целью выполнения лабораторных работ является исследование свойств электрических сетей, подготовка расчётных составляющих элементов и схемы замещения сети, изучение и применение наиболее эффективных методов решения поставленной задачи.

Алгоритм выполнения лабораторных работ включает в себя следующую последовательность:

1. Подготовка к лабораторной работе (чтение задания и методических указаний, заготовка таблиц для заполнения результатами опытов).
2. Допуск к лабораторной работе (беседа с преподавателем, который проверяет знание студентом цели работы, ее содержания, представления об объекте исследования, понимания технологии и порядка проведения опытов).
3. Проведение эксперимента (в соответствии с заданием выполнение ряда опытов в вычислительном эксперименте с помощью виртуального лабораторного стенда).
4. Обработка результатов эксперимента (проверка на наличие грубых ошибок, построение графиков и диаграмм, формулировка выводов)
5. Оформление отчета по лабораторной работе (отчет оформляется в соответствии с правилами, оговоренными преподавателем в печатном или рукописном виде).
6. Подготовка к защите лабораторной работе (изучение теоретического материала по вопросам, представленным в методических указаниях и сопоставление результатов теоретического анализа с экспериментальными данными, полученными в работе)
7. Защита лабораторной работы (коллективное или индивидуальное собеседование с преподавателем по заданным вопросам).

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

Моделирование параметров схем замещения воздушных линий электропередачи, наземных и подземных кабельных линий.

Цель работы: Изучение энергетического процесса и распределения напряжений в схеме замещения 2-х проводной линии электропередачи при постоянной величине напряжения в начале линии в зависимости от тока в линии, определяемого количеством включенных потребителей электрической энергии.

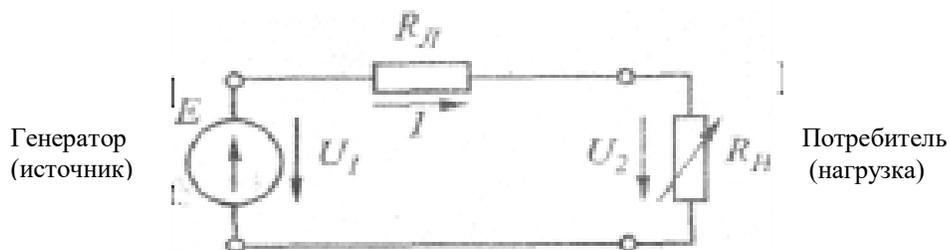
Краткие теоретические сведения

Всякий потребитель электрической энергии получает ее от генератора по воздушной или кабельной линии передачи, выполненной из металлического (медного, алюминиевого или стального) провода и обладающей определенным сопротивлением. Это сопротивление обуславливает падение напряжения и потерю мощности в линии.

При изменении числа включенных потребителей электрической энергии изменяется величина тока в линии, что обуславливает изменение падения напряжения и потерь мощности в линии и отражается на работе потребителей.

Для теоретического и экспериментального изучения процессов в двухпроводной линии электропередачи пользуются эквивалентной схемой замещения (рис. 1), где $R_{л}$ - сопротивление линии; $R_{н}$ - эквивалентное сопротивление всех подключенных потребителей; I - ток в линии; U_1 - напряжение в начале линии; U_2 - напряжение в конце линии (у потребителя).

Рисунок 1



С учетом принятых обозначений:

$$I = U_1 / R_{л} + R_{н} \quad (1)$$

$$\Delta U = U_1 - U_2 = I \cdot R_{л} \quad (2)$$

$$R_{л} = \Delta U / I \quad (3)$$

$$R_{н} = U_2 / I \quad (4)$$

Энергетический процесс в схеме характеризуется следующим соотношением мощностей:

- мощность, отдаваемая генератором в линию

$$P_1 = U_1 \cdot I \quad (5)$$

- мощность потерь электрической энергии в линии

$$\Delta P = \Delta U \cdot I = R_{\text{л}} \cdot I^2 \quad (6)$$

- мощность, отдаваемая линией потребителю (мощность нагрузки)

$$P_2 = U_2 \cdot I = R_{\text{н}} \cdot I^2 \quad (7)$$

Коэффициент полезного действия линии η определяется как отношение мощностей P_2 и P_1 :

$$\eta = P_2 / P_1 = (P_1 - \Delta P) / P_1 = 1 - \Delta P / P_1 \quad (8)$$

Если в формуле (7) ток выразить через отношение мощности потребителя к напряжению у потребителя и подставить это выражение для тока в формулу (6), то для мощности потерь электрической энергии в линии получается следующее выражение:

$$\Delta P = P_2^2 \cdot R_{\text{л}} / U_2^2 \quad (9)$$

Согласно (9), при постоянной мощности нагрузки P_2 величина потерь в линии обратно пропорциональна квадрату напряжения, т.е. электрическую энергию экономично передавать при высоких напряжениях. Однако с ростом напряжения увеличивается стоимость изоляции линии. На практике применяют тем большее напряжение, чем больше передаваемая мощность и дальность передачи. Заменив в формуле (8) P_1 и P_2 их выражениями по (5) и (7), получим новую форму записи выражения для расчета коэффициента полезного действия линии:

$$\eta = U_2 / U_1 \quad (10)$$

Схема лабораторной установки представлена на рисунке 2.

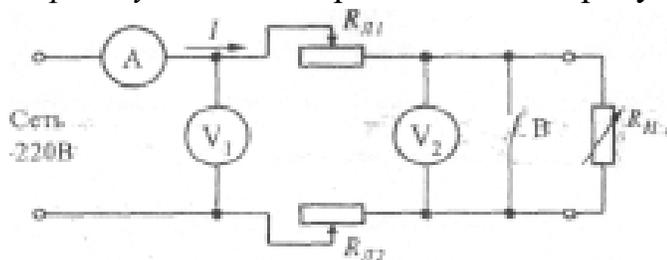


Рисунок 2

Образец оформления полученных данных (с примером полученных данных) представлен в таблице 1.

Таблица 1

№ п/п	Измерено			Вычислено								
	I, А	U ₁ , В	U ₂ , В	ΔU , В	R _л , Ом	R _и , Ом	P ₁ , Вт	P ₂ , Вт	ΔP , Вт	R _и , Ом	η	
1	0	220	220	0	0	40	0	0	0	0	0	1
2	1	220	180	40	40	40	220	180	40	180	0,82	
3	1,8	220	135	85	47,2	40	396	243	153	75	0,61	
4	2,15	220	115	105	48,8	40	473	247,2	225,4	53,5	0,52	
5	2,83	220	90	130	45,9	40	622,6	245,7	367,9	31,8	0,41	
6	3,18	220	75	145	45,6	40	699,6	238,5	461,1	23,6	0,34	
7	3,25	220	60	160	49,2	40	715	195	512	18,5	0,27	
8	5	220	0	220	44	40	1100	0	1100	0	0	

Построенные по результатам опытов, графики должны соответствовать представленным на рисунках 3 и 4.

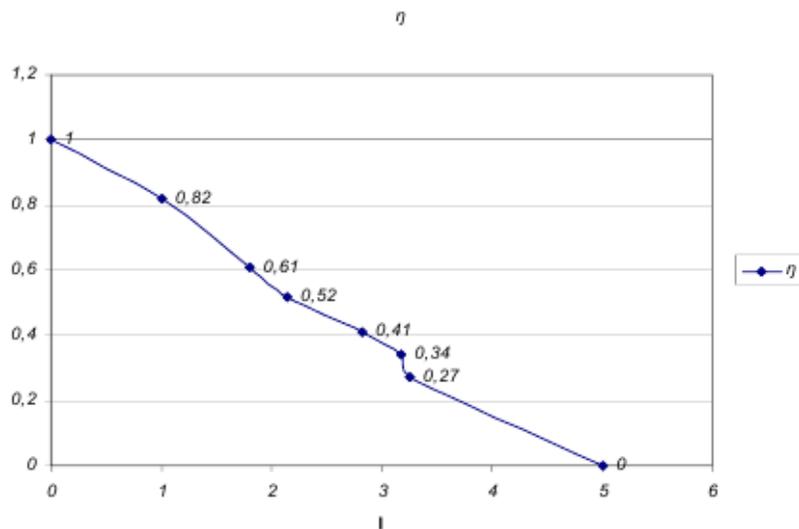


Рисунок 3

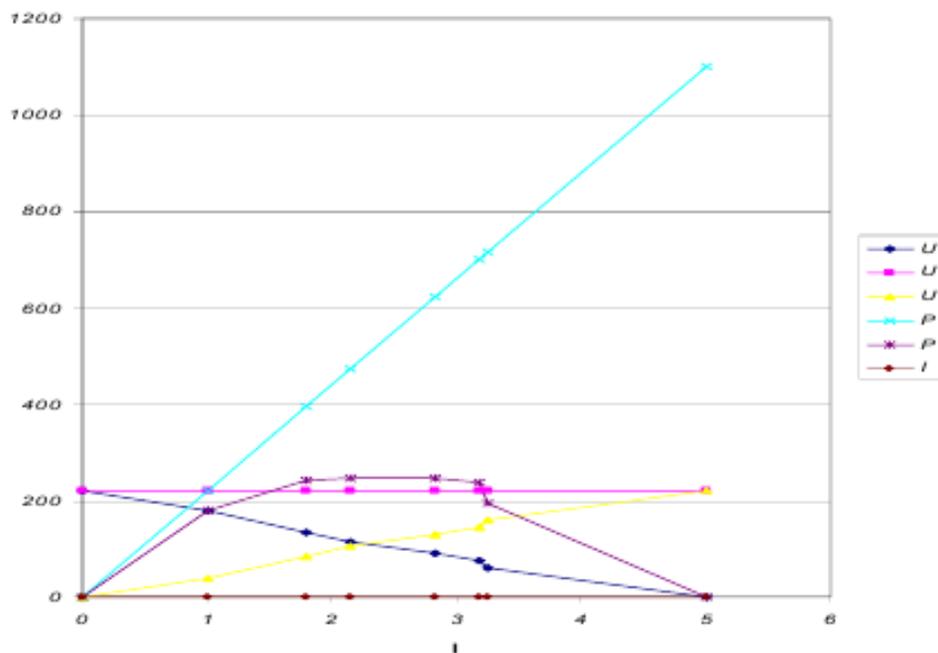


Рисунок 4

При соотношении сопротивлений линии электропередачи $R_{л} = 45,9$ и нагрузки $R_{н} = 31,8$ и при значении коэффициента полезного действия $\eta = 0,41$ мощность нагрузки $P_2 = 254,7$ является максимальной.

При изменении числа включенных потребителей электрической энергии изменяется величина тока в линии, что обуславливает изменение падения напряжения и потерь мощности в линии и отражается на работе потребителей.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2

Моделирование потерь энергии в линиях электропередачи и трансформаторах.

Цель работы: определение влияния сопротивления линии электропередачи на энергетические показатели транспорта электрической энергии. Определяются потери энергии и изменение напряжения при различной длине линии электропередачи.

Краткие теоретические сведения.

В общем случае линия электропередачи является объектом с распределенными параметрами и содержит распределенные по длине линии активное сопротивление, индуктивность и емкость. Активное сопротивление зависит от сечения и материала проводника линии. Индуктивность и емкость определяется расстоянием между проводами.

В данной работе рассматривается упрощенная модель линии электропередачи, которая представлена сосредоточенным резистивным элементом. Модель такого объекта представлена на рисунке 5.

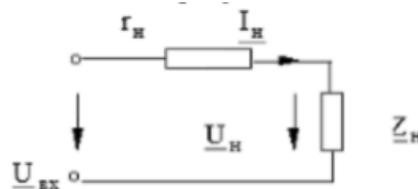


Рисунок 5

При токе нагрузки I_n в линии электропередачи создается падение напряжения $U_{л}=R_{л}\cdot I_n$

Напряжение на нагрузке U_n отличается от напряжения в начале линии электропередачи $U_{вх}$: $U_n=U_{вх}-R_{л}\cdot I_n$

В активном сопротивлении линии электропередачи электрическая энергия переходит в тепло. Мощность потерь в линии $P_{л}=I_n^2\cdot R_{л}$

Для обеспечения потребителей напряжением, близким к номинальному, входное напряжение линии электропередачи делают больше номинального напряжения потребителей.

Сечение линии электропередачи, которое и определяет ее сопротивление, может быть выбрано из двух независимых условий. В более ранние времена это сечение определялось по допустимой плотности тока при максимальной нагрузке. Для

открытых воздушных линий электропередачи для алюминиевых проводов допустимая максимальная плотность тока составляет 20 ампер на квадратный миллиметр. В настоящее время с ростом стоимости цветных металлов сечение линии электропередачи выбирается исходя из экономических соображений. В задачу линейного программирования вводятся граничные условия по стоимости потерь электроэнергии и цене единицы длины линии электропередачи за некоторое время, которые в экономических теориях и расчётах называются удельными затратами.

Независимо от этого, уменьшение тока нагрузки за счет снижения ее реактивного тока, приводит к положительному результату - уменьшаются необратимые потери электрической энергии в линии электропередачи.

Проведение эксперимента

В режиме холостого хода измерить напряжение на входе и выходе линии электропередачи.

Оформление отчета

В отчете привести вычисления падения напряжения в линии электропередачи и величину мощности потерь.

Контрольные вопросы

1. По какому закону изменяется напряжение вдоль однородной линии электропередачи?
2. Как влияют распределённые индуктивность и ёмкость на изменение напряжения вдоль линии электропередачи.
3. Из каких соображений выбирается сечение линии?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3

Моделирование потерь напряжения в линиях электропередачи и трансформаторах

Цель работы: определить какие факторы, и как влияют на потери напряжения. Определить КПД ЛЭП.

Краткие теоретические сведения

От генератора до потребителя электроэнергия передается по проводам, т.е. по линии электропередачи. Так как ЛЭП характеризуется определенным сопротивлением, то на нее тратится активная мощность на нагрев проводов. Чем больше сопротивление ЛЭП, тем больше и потери мощности. На ЛЭП имеет место и потери напряжения. Чем больше ток или сопротивление проводов, тем больше и потери мощности и напряжения.

Потери электроэнергии в проводах зависят от силы тока, поэтому при передаче её на дальние расстояния, напряжение многократно повышают (во столько же раз уменьшая силу тока) с помощью трансформатора, что при передаче той же мощности позволяет значительно снизить потери. Однако с ростом напряжения начинают происходить различные разрядные явления.

В воздушных линиях сверхвысокого напряжения присутствуют потери активной мощности на корону (коронный разряд). Эти потери зависят во многом от погодных условий (в сухую погоду потери меньше, а в дождь, изморось или снег эти потери возрастают) и расщепления провода в фазах линии.

Потери на корону для линий различных напряжений имеют свои значения (для линии ВЛ 500 кВ среднегодовые потери на корону составляют около $\Delta P=9-11$ кВт/км).

Так как коронный разряд зависит от напряжённости на поверхности провода, то для уменьшения этой напряжённости в воздушных линиях сверхвысокого напряжения применяют расщепление фаз. То есть вместо одного провода применяют два и более проводов в фазе. Располагаются эти провода на равном расстоянии друг от друга. Получается эквивалентный радиус расщеплённой фазы, этим уменьшается напряжённость на отдельном проводе, что в свою очередь уменьшает потери.

Выполнение работы

1. Собрать установку согласно схеме (см. рис. 6)

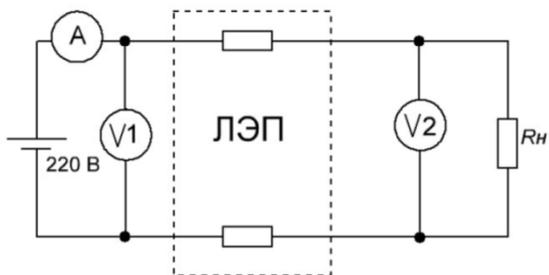


Рис. 6

2. Подать на начало ЛЭП напряжение 220В и подключить нагрузку $R_n = 1 \text{ кОм}$
3. Замерить напряжение на выходе ЛЭП и ток.
4. Записать измеренные величина в таблицу 2.
5. Произвести расчеты и сделать вывод.

Таблица 2 - Результаты измерений

№ опыта	Измерения			Расчет				Материал проводов
	U1	U2	I	$\Delta U'$	$\Delta P'$	η	Rпр	
	В	В	А	В	Вт	%	Ом	
1								
2								
3								

Содержание отчета

1. Название и цель работы
2. Схемы
3. Таблицы
4. Ответы на контрольные вопросы
5. Вывод

Контрольные вопросы

1. Какая допускается потеря напряжения по госту в силовой линии и линии освещения?
2. Какой металл лучше всего проводит электрический ток?
3. От чего зависит потеря напряжения в проводах?
4. Почему для нагревательных приборов применяют материалы с большим значением удельного сопротивления?

Лабораторная работа №4

Исследование режимов работы ЛЭП

Цель работы: Изучение режимов работы линии электропередачи (ЛЭП) путем проведения вычислительного эксперимента на ЭВМ.

Задание

1. Построить зависимость напряжения в конце ЛЭП (U_2) и потерь активной мощности (ΔP) от мощности нагрузки. Выяснить влияние реактивной мощности нагрузки на полученные зависимости, для чего выполнить эксперименты при различных коэффициентах реактивной мощности нагрузки.

Построить зависимость соотношения зарядной мощности и потерь реактивной мощности ЛЭП от передаваемой мощности во всех рассматриваемых случаях. Определить по графику величину натуральной мощности ЛЭП.

2. Провести анализ режима холостого хода ЛЭП.

3. Исследовать зависимости напряжения в конце ЛЭП и потерь активной мощности в ЛЭП от величины компенсации реактивной мощности нагрузки.

4. Исследовать влияние величин векторов напряжений по концам ЛЭП и угла между ними на передаваемую активную и реактивную мощность.

5. Построить область допустимых режимов работы ЛЭП (в координатах P_2 , Q_2).

Краткие теоретические сведения.

Линия электропередачи имеет начало, откуда подается питание (мощность), и конец, где присоединяется нагрузка, заданная своей мощностью.



Рисунок 1 - Схема ЛЭП

Мощность нагрузки (активная и реактивная) изменяется во времени в соответствии с графиком и существуют минимальное и максимальное значения мощностей, возможные для данной нагрузки. Их можно определить из суточных графиков нагрузки в период зимнего максимума (как правило, конец декабря) и летнего минимума (середина июня). Такие суточные графики для характерных дней ежегодно составляются во всех энергосистемах.

Рабочие напряжения на ЛЭП имеют технические ограничения, связанные с уровнем изоляции и условиями работы оборудования электрической сети, а также требованиями, предъявляемыми потребителями. Существуют предельное минимальное U_{\min} и предельное максимальное U_{\max} значения напряжения в ЛЭП.

Ток по линии также имеет предельно допустимое значение по условиям нагрева проводов $I_{\text{доп}}$.

Указания к выполнению работы.

1. Для исследования режимов ЛЭП предлагается использовать специально разработанные учебные программы для ЭВМ или какие-либо другие программные средства. Инструкция по работе с программами выдается преподавателем и имеется в справочной системе программ.

2. С помощью псевдоизмерений (вычислений) потоков мощности по концам ЛЭП можно вычислить потери активной мощности и разность потерь реактивной мощности и зарядной мощности. Выполняя опыты для различных значений передаваемой мощности, по результатам псевдоизмерений следует построить зависимости напряжения в конце ЛЭП, потерь мощности в ЛЭП и реактивных мощностей в ЛЭП ($Q_1 - Q_2$) от активной мощности нагрузки. Рекомендуется взять для выполнения расчетов коэффициент реактивной мощности нагрузки $\text{tg}(\varphi) = 0,5$; $\text{tg}(\varphi) = 0$ и $\text{tg}(\varphi) = -0,5$

3. При одной и той же активной мощности нагрузки реактивную мощность в конце ЛЭП можно изменять с помощью специальных устройств – компенсаторов, что приводит к изменению $\text{tg}(\varphi)$.

Необходимость компенсации реактивной мощности вызвана тремя причинами:

- регулирования напряжения;
- снижения потерь энергии (мощности);
- повышения пропускной способности ЛЭП.

Реактивная мощность в конце ЛЭП равна:

$$Q_2 = Q_H - Q_{КУ},$$

где $Q_{КУ}$ - мощность компенсирующего устройства, которая варьируется в пределах, обусловленных типом и номинальной мощностью КУ.

Выполняя эксперименты с различными значениями $Q_{КУ}$ в заданных пределах, следует построить зависимость напряжения в конце линии от мощности компенсирующего устройства. Рекомендуется выполнить опыты с компенсацией реактивной мощности нагрузки от нуля до ее полной компенсации и даже частичной перекомпенсации (реактивная мощность в конце ЛЭП станет отрицательной величиной).

4. Для ВЛ высокого и сверхвысокого напряжения обнаруживается уникальная связь между потоками мощности по линии и напряжениями по концам ЛЭП. Для исследования такой связи строятся зависимости активной и реактивной мощности линии от:

а) разности величин векторов по концам линии (потери напряжения) при неизменном угле между векторами напряжений;

б) угла между векторами напряжения по концам линии δ при постоянстве величин напряжений по концам линии.

Фактически, в первом случае (а) меняется только напряжение на одном из концов линии, например, в конце, а во втором (б) – угол между векторами,

который подбирается из соображений допустимых значений потоков мощности. При передаче мощности от начала линии к концу угол δ имеет отрицательные значения, показывающие отставание вектора U_2 от U_1 .

5. Область существования допустимых режимов ЛЭП обычно строится в координатах P_2 , Q_2 . По данной области можно судить о пропускной способности ЛЭП и возможных перетоках реактивной мощности.

При построении области допустимых режимов ЛЭП учитывают ряд ограничений, среди которых ограничения на уровни напряжения, максимальный ток в линии, направление мощности и др.

Ограничение по $I_{\text{доп}}$ можно представить как полуокружность радиуса $S_{\text{max}} = \sqrt{3}I_{\text{доп}}U_{\text{ном}}$. Кривые ограничений по U_{min} и U_{max} получаются при варьировании угла δ между напряжениями по концам ЛЭП. Следует задать в конце ЛЭП напряжение равное U_{min} и менять угол δ в небольших пределах (примерно до $-10 \dots -20^\circ$) с шагом $1 \dots 2^\circ$ так, чтобы получить зависимость между P_2 и Q_2 в виде кривых, отсекающих от построенной полуокружности области недопустимых значений мощностей. Таким же образом строится кривая ограничения для U_{max} .

Исходные данные

1. Номинальное напряжение ЛЭП.
2. Длина и марка провода ЛЭП.
3. Предельно допустимый ток по проводу заданной марки.
4. Мощности режима максимальных нагрузок.
5. Напряжение пункта питания (начала линии).
6. Предельно допустимые уровни напряжения в конце ЛЭП.

Контрольные вопросы к защите

1. Объяснить изменение напряжения в конце ЛЭП от мощности нагрузки для различных коэффициентов реактивной мощности.
2. Объяснить изменение потерь активной мощности в ЛЭП от мощности нагрузки для различных коэффициентов реактивной мощности.
3. Объяснить соотношение потерь реактивной мощности и зарядной мощности ЛЭП от мощности нагрузки для различных коэффициентов реактивной мощности?
4. Чем характеризуется режим натуральной мощности ЛЭП? Какая величина натуральной мощности линии получилась в лабораторной работе?
5. Объяснить полученное соотношение напряжений по концам ЛЭП в режиме холостого хода.
6. Объяснить зависимости напряжения в конце ЛЭП и потерь мощности от величины компенсации реактивной мощности нагрузки.
7. Объяснить зависимости потоков мощностей по ЛЭП от соотношения модулей напряжения по концам линии и от угла между векторами напряжений.
8. Пояснить принципы построения области допустимых режимов ЛЭП.

9. Какие условия учитываются при определении пропускной способности ЛЭП?

10. Как по области допустимых режимов работы ЛЭП определить:

- максимально возможную передаваемую активную мощность при заданной реактивной мощности в конце линии?
- величину реактивной мощности в конце линии, которая может обеспечить заданную передаваемую активную мощность?
- максимально возможную реактивную мощность индуктивного характера в конце линии?
- максимально возможную реактивную мощность емкостного характера в конце линии?

Лабораторная работа № 5

Регулирование напряжения в электрической сети 110/10 кВ

Цель работы: Изучение принципов, методов и средств регулирования напряжения в электрической сети 110/10 кВ.

Задание

В электрической сети 110/10 кВ (рис.3) проверить возможность и определить необходимые средства регулирования напряжения на шинах нагрузки понижающей подстанции. Регулирование напряжения осуществить в соответствии с принципом встречного регулирования.

1. Для режимов максимальных и минимальных нагрузок опытным путем подобрать регулировочные ответвления на устройстве РПН (Регулирование Под Нагрузкой) понижающих трансформаторов.

Указание. Напряжение на шинах питающей подстанции задаётся преподавателем для обоих режимов.

2. Определить требования к диапазону допустимых значений напряжения на шинах центра питания (питающей подстанции) в режимах максимальных и минимальных нагрузок, при которых еще возможно поддержание желаемого напряжения на шинах нагрузки понижающей подстанции.

Указание. Переключатель ответвлений РПН в этом случае выводится в крайнее положение, соответствующее наиболее возможному повышению напряжения в режиме максимальных нагрузок и наиболее возможному его понижению – в режиме минимальных нагрузок.

3. Проверить возможность регулирования напряжения в послеаварийных (ремонтных) режимах.

Указание. Виды аварийных режимов задаются преподавателем.

4. Подобрать мощность компенсирующего устройства, которое можно установить на шинах нагрузки в режиме максимальных нагрузок при понижении напряжения на шинах питающей подстанции на 5 % ниже минимально возможного значения.

Указание. Расчет произвести путем закрепления желаемого значения напряжения на шинах нагрузки при крайнем положении переключателя отпаяк, соответствующем наиболее возможному повышению напряжения на шинах нагрузки.

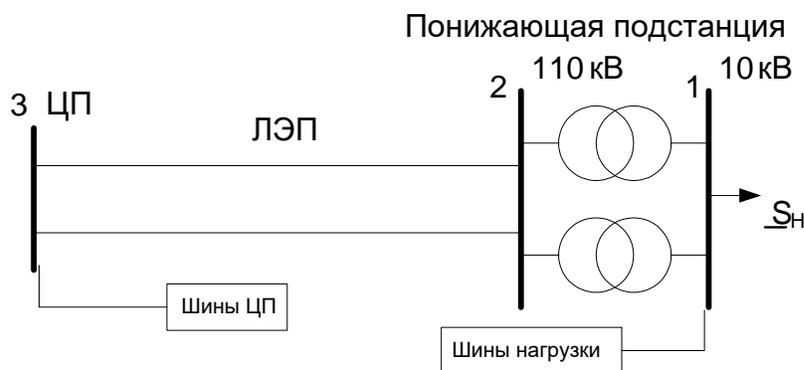


Рисунок 2 - Схема сети 110/10 кВ

Краткие теоретические сведения.

Различают три принципа регулирования напряжения:

- 1) стабилизация;
- 2) по заданному графику напряжения;
- 3) встречное регулирование.

По первому принципу напряжение поддерживается постоянным в течение всего времени суток и может менять заданный (желаемый) уровень очень редко, например, раз в сезон.

Регулирование по заданному графику предполагает наличие 2-х или более уровней напряжения, которые в свои периоды времени поддерживаются постоянными, как по принципу стабилизации, например в ночные и дневные часы.

Принцип встречного регулирования предполагает гибкое изменение уровня напряжения, в зависимости от изменения нагрузки в сети, т. е. напряжение регулируется в зависимости от тока нагрузки.

На рисунке 3 изображены суточные графики активной и реактивной мощности нагрузки. Уровни напряжения, на поддержание которых настроены органы регулирования (желаемое напряжение), по всем трем принципам регулирования будут иметь графики, изображенные на рисунке 4.

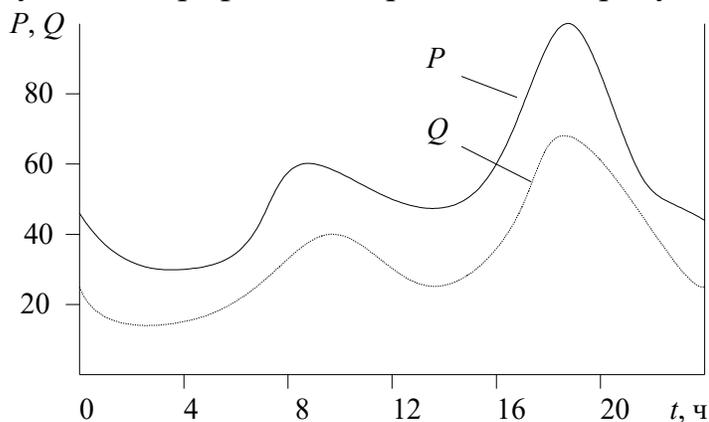


Рисунок 3 - Графики активной и реактивной мощности нагрузки

В третьем случае $U_{\text{жел}}$ повторяет по форме график токовой нагрузки и при I_{min} имеет $U_{\text{жел}(\text{min})} = U_{\text{ном}}$, а при $I_{\text{max}} - U_{\text{жел}(\text{max})} = (1,05...1,1)U_{\text{ном}}$, в зависимости от конфигурации и протяженности сети, которая питается от шин нагрузки понижающей подстанции.

Следует отметить, что действительные графики напряжения отличаются от графиков желаемого напряжения из-за дискретности средств регулирования, случайных ошибок, помех и аварийных ситуаций. Непосредственно сам график желаемого напряжения с учетом допустимой погрешности называется законом регулирования напряжения.

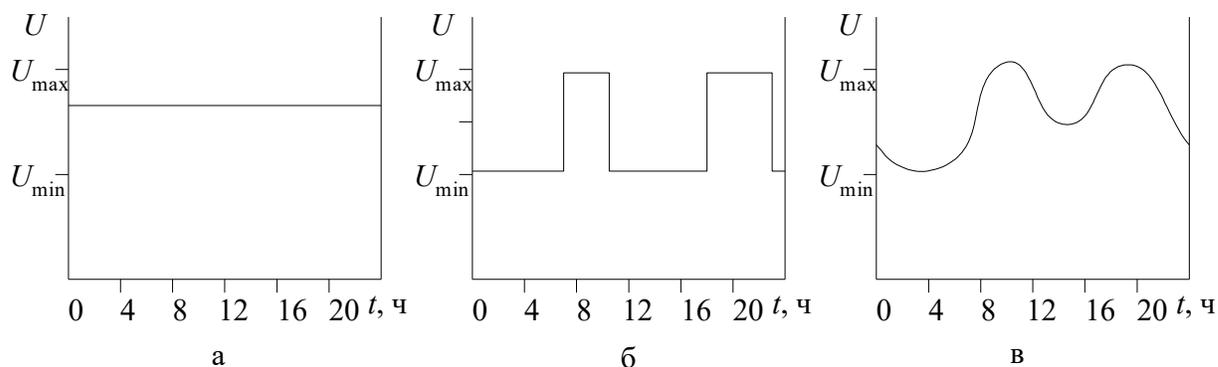


Рисунок 4 - Законы регулирования напряжения

К методам регулирования напряжения относят: централизованное регулирование средствами центра питания, регулирование изменением падения напряжения в элементах электрической сети и локальное (местное) регулирование с помощью регулирующих устройств трансформаторов понижающих подстанций.

К средствам регулирования напряжения относят устройства, с помощью которых можно применять различные методы регулирования напряжения. К таким устройствам относят регулировочные обмотки с ответвлениями трансформаторов, генераторы электростанций, реакторы, батареи конденсаторов, статические тиристорные компенсаторы, синхронные компенсаторы и др. Все средства регулирования снабжаются органами автоматического управления, позволяющими автоматически выполнять закон регулирования.

Практически все трансформаторы подстанций высокого напряжения снабжаются устройством РПН, и поэтому всегда в первую очередь проверяется возможность регулирования напряжения на шинах подстанции с помощью изменения коэффициентов трансформации трансформаторов с РПН.

У двухобмоточных трансформаторов регулировочные обмотки устройства РПН устанавливаются на стороне высокого напряжения (ВН). Переключение с одного ответвления на другое приводит к изменению коэффициента трансформации и, следовательно, к изменению напряжения на стороне низкого напряжения (НН) – шинах нагрузки. Это локальное регулирование напряжения.

В случае недостаточности диапазона регулирования у РПН можно поставить на шинах нагрузки батарею конденсаторов или другое компенсирующее устройство, которое изменит поток реактивной мощности и падение напряжения в сети – это другой метод регулирования.

Указания к выполнению работы

1. Схема электрической сети 110/10 кВ, (см. рис. 2), которая рассматривается в настоящей работе, является частью схемы, изображенной на рис 5, которая будет использоваться в лабораторной работе 3.

2. Для выполнения работы используется специализированная программа, с помощью которой можно имитировать режимы работы электрической сети и подбирать параметры устройств регулирования напряжения. Руководство к

работе по этой программе выдается преподавателем и имеется в справочной системе к программе.

3. Перед выполнением каждого пункта задания следует составить план проведения опытов, которые необходимо выполнить. Полезно приготовить таблицу, в которую будут записываться полученные результаты. В таблице 1 приведен пример записи результатов опытов при подборе отпаек.

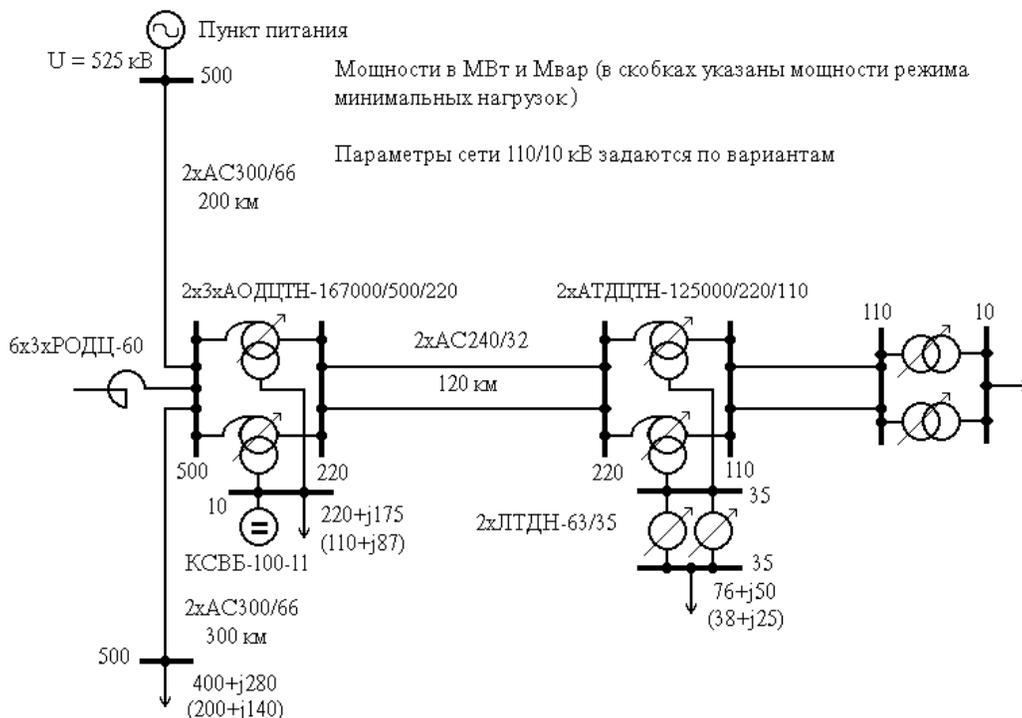


Рисунок 5- Принципиальная схема сети 500/220/.../10 кВ

Таблица 1 - Пример записи результатов опытов по подбору регулировочных ответвлений в режимах максимальных и минимальных нагрузок

Номер опыта	Номер ответвления	Напряжение ответвления, кВ	Мощность ЦП, МВ·А	Напряжение на шинах НН ПС, кВ	Примечание
Режим максимальных нагрузок: $U_{ЦП} = 123$ кВ, $S_H = 60 + j40$ МВ·А, $U_{жел} = 10,5$ кВ. Начальная точка – номинальное регулировочное ответвление.					
1	0	115	$64 + j57,1$	9,12	Мало
2	-9	96,56	$64 + j57,1$	10,86	Велико
3	-7	100,7	$64 + j57,1$	10,41	Мало
4	-6	98,62	$64 + j57,1$	10,63	Удовлетворительно
Режим минимальных нагрузок: $U_{ЦП} = 118$ кВ, $S_H = 32 + j20$ МВ·А, $U_{жел} = 10,0$ кВ. Начальная точка – номинальное регулировочное ответвление.					
1	0	115	$33,1 + j21,2$	9,82	Мало
2	-1	113	$33,1 + j21,1$	10,00	Удовлетворительно

Таблица 2- Пример записи результатов опытов по подбору напряжения на шинах питающей подстанции в режимах максимальных и минимальных нагрузок

Номер опыта	Напряжение п.п. U_3 , кВ	Напряжение на шинах НН U_1 , кВ	Примечание
Режим максимальных нагрузок, $S_H = 60 + j40$ МВА, $U_{жсл} = 10,5$ кВ, регулировочное ответвление -9 , $U_{отв} = 96,58$ кВ. Определение нижнего предела U_3 .			
1	121	10,56	Удовлетворительно
Режим максимальных нагрузок, $S_H = 60 + j40$ МВА, $U_{жсл} = 10,5$ кВ, регулировочное ответвление $+9$, $U_{отв} = 133,4$ кВ. Определение верхнего предела U_3 .			
1	126	8,18	Недостаточно Верхний предел 126 кВ
Режим минимальных нагрузок, $S_H = 32 + j20$ МВА, $U_{жсл} = 10,0$ кВ, регулировочное ответвление -9 , $U_{отв} = 96,58$ кВ. Определение нижнего предела U_3 .			
1	110	10,7	Велико
2	105	10,0	Удовлетворительно
Режим минимальных нагрузок, $S_H = 32 + j20$ МВА, $U_{жсл} = 10,0$ кВ, регулировочное ответвление $+9$, $U_{отв} = 133,4$ кВ. Определение верхнего предела U_3 .			
1	126	9,17	Недостаточно Верхний предел 126 кВ

По результатам таблице 2 следует подготовить данные по допустимым диапазонам изменения напряжения в ЦП и мощности передаваемой из ЦП в сеть 110,10 кВ в режимах максимальных и минимальных нагрузок для выполнения лабораторной работы 3. Пример записи таких данных приведен в таблице 3.

Таблица 3 - Данные для выполнения лабораторной работы № 3

Режим	Мощность S_3 , МВА	Пределы U_3 , кВ
максимальных нагрузок	$64,6 + j57,1$	[121; 126]
минимальных нагрузок	$33,1 + j21,1$	[105; 126]

Исходные данные

1. Принципиальная схема электрической сети 110/10 кВ (см. рисунок 2)
2. Марка проводов и протяженность ЛЭП.
3. Количество и тип трансформаторов понижающей подстанции.
4. Активные и реактивные мощности нагрузки для режимов максимальных и минимальных нагрузок.
5. Ориентировочный уровень напряжения шин центра питания.

Контрольные вопросы к защите

1. Методы регулирования напряжения в электрических сетях энергосистем.
2. Принципы регулирования напряжения в электрических сетях и области их применения.

3. Пояснить принцип встречного регулирования напряжения. Почему в режиме максимальных нагрузок напряжение на шинах питающей подстанции поддерживается в зависимости от сети в пределах $(1,05...1,10) U_{ном}$, а в режиме минимальных нагрузок приблизительно равным номинальному напряжению?

4. Нормы установившегося отклонения напряжения δU_y (нормально допустимые и предельно допустимые значения) на выводах приемников электрической энергии.

5. Какие требования предъявляются к уровням напряжения у оборудования питающих и распределительных электрических сетей?

6. В какой из обмоток устанавливается устройство регулирования напряжения РПН в двухобмоточных трансформаторах и почему?

7. Какие компенсирующие устройства используются для регулирования напряжения в электрических сетях 10...100 кВ?

8. В каком месте выгоднее устанавливать компенсирующее устройство на понижающей подстанции: на стороне высокого или низкого напряжения и почему?

Лабораторная работа № 6

Регулирование напряжения в передающих и системообразующих электрических сетях

Цель работы: Изучение принципов, методов и средств регулирования напряжения в передающих и системообразующих электрических сетях.

Задание

В электрической сети 500-220-110-35-10 кВ, расчетная схема которой приведена на рисунке 6, выполнить оценку применимости предложенных средств регулирования напряжения для обеспечения желаемых и допустимых уровней напряжения на шинах подстанций.

Регулирование напряжения на шинах низкого напряжения подстанций осуществить в соответствии с принципом встречного регулирования.

Напряжения на шинах среднего напряжения подстанций следует поддерживать в заданных пределах.

Напряжения на шинах высокого напряжения подстанций не должно превышать максимально допустимых рабочих значений.

1. Для режимов максимальных и минимальных нагрузок опытным путем подобрать регулировочные ответвления на устройстве РПН понижающих трансформаторов и переключающего устройства линейного регулятора, значения мощности синхронного компенсатора, батареи конденсаторов и количество включенных реакторов.

Указание. Напряжение на шинах питающей подстанции задаётся преподавателем для обоих режимов.

Уровни напряжения на шинах 110 кВ понижающей подстанции 220/110/35 кВ поддерживать в соответствии со значениями, полученными в работе 2.

2. Проверить возможность регулирования напряжения в послеаварийных (ремонтных) режимах.

Указание. Виды аварийных режимов задаются преподавателем.

Краткие теоретические сведения.

К уровням напряжения шин станций и подстанций ЭЭС, имеющих различные ступени номинальных напряжений, предъявляются разные требования. Эти требования вызваны ограничениями по техническими условиями эксплуатации оборудования, оптимальными режимами работы и требованиями к показателям качества напряжения. Для обеспечения требуемого отклонения напряжения у электроприемников ведется регулирование напряжения практически во всех узлах электрической сети. Чем ближе точка, в которой регулируется напряжение, к электроприемнику, тем жестче требования к уровню напряжения.

Проверка возможности регулирования напряжения в электрической сети с помощью имеющихся или намеченных к установке средств регулирования производится расчетным путем.

При этом на отдельных шинах напряжение устанавливается на жесткий желаемый уровень, а на других напряжение контролируется так, чтобы оно не вышло за допустимые пределы, или регулируется, чтобы "помочь" другим средствам выставить напряжения на желаемый уровень.

Перед расчетами следует проанализировать имеющиеся средства с целью определения их воздействия на напряжения каждой шин ЭЭС. Так, например, изменение напряжения на шинах генераторов ЭС повлияет на напряжения всех подстанций, получающих питание от данной ЭС; изменение положения регулировочных ответвлений на тупиковой подстанции влияет на напряжение шин только этой подстанции и т. п.

Расчеты, как правило, являются многократными и состоят в подборе параметров различных средств регулирования. Современные программы расчетов

режимов позволяют сразу за расчет одного режима ввести режим в так называемую допустимую область, где все параметры режима находятся в дозволённых пределах. Однако в учебных целях следует испробовать поиск допустимого по напряжению режима методом подбора (перебора вариантов).

Стратегия поиска может быть различной, но одной из наиболее эффективных можно считать направленный перебор вариантов, начиная с обеспечения удовлетворительных уровней напряжения в сети с наибольшим номинальным напряжением и затем переходить на следующие более низкие ступени $U_{ном}$.

В некоторых узлах можно зафиксировать уровень напряжения, если к нему присоединено компенсирующее устройство. Но при этом следует следить за значением мощности компенсирующего устройства, которое не должно выйти за свои пределы.

Может потребоваться вернуться снова к регулированию напряжения на ступени с высшим номинальным напряжением и при необходимости повторить расчеты.

Для выполнения расчетов необходимо составить расчетную схему электрической сети, таблицу напряжений отпаяк РПН трансформаторов, автотрансформаторов и линейных регуляторов. На расчетной схеме следует отметить регулируемые элементы (стрелками для РПН, СК и БСК) и надписать их пределы регулирования.

Узловые точки расчетной схемы электрической сети можно разбить на 3 группы (подмножества):

- 1) узлы, в которых следует регулировать напряжение (поддерживать $U_{жел}$);
- 2) узлы, напряжение в которых следует контролировать (для таких узлов задаются предельные минимальные и максимальные значения);
- 3) узлы с неконтролируемыми напряжениями (фиктивные модельные образования).

Указания к выполнению работы

1. Перед началом работы следует подготовить исходные данные, которые были получены в лабораторной работе 2.

2. На расчетной схеме, которая используется в работе, имеются все необходимые для расчета режима данные, которые внесены в специальный текстовый файл по правилам, указанным в инструкции к программе для ЭВМ.

3. Расчеты следует начать с получения так называемого базового режима. При этом средства регулирования находятся либо в отключенном состоянии, либо в положении, соответствующем номинальному значению его параметров.

4. Все рассчитанные режимы без исключения должны быть запротоколированы, т. е. их основные параметры записаны в специальную таблицу в соответствующую строку.

Примерный вид формы записи для протоколирования расчетов показан в табл. 4. Вверху таблицы над каждой колонкой с напряжениями шин следует надписать либо желаемый уровень напряжения, либо верхний и нижний пределы.

Узлы с неконтролируемыми напряжениями в таблицу не включаются.

Исходные данные

1. Принципиальная схема электрической сети.
2. Номинальные напряжения электрической сети.
3. Марки проводов ЛЭП и типы трансформаторов.
4. Типы и параметры устройств регулирования напряжения.
5. Расчетная схема электрической сети.
6. Активные и реактивные мощности нагрузок для режимов максимальных и минимальных нагрузок. Для узла 3 данные берутся из лабораторной работы № 2.
7. Напряжение шин питающей подстанции.

Вопросы к защите

1. Средства и методы регулирования напряжения в передающих и системообразующих электрических сетях.
2. Сравнительная характеристика батарей конденсаторов и синхронных компенсаторов как средств регулирования напряжения в электрических сетях.
3. Каким образом влияет на напряжение включение в ЛЭП шунтирующих реакторов? В каких случаях и в каких сетях применяют шунтирующие реакторы?
4. Какие требования предъявляются к уровням напряжения для оборудования электрических сетей сверхвысокого напряжения?
5. Пояснить последовательность выбора параметров средств регулирования напряжения в сети с несколькими ступенями номинальных напряжений.
6. Как осуществляется регулирование напряжения на шинах подстанций с автотрансформаторами и трехобмоточными трансформаторами?

Таблица 4 - Напряжения в узлах сети при подборе параметров средств регулирования (числовые данные даны для примера)

Номер	п/с 500/220/10 кВ			п/с 220/110/35 кВ		Узлы с регулируемыми и контролируемыми U							Примечание (параметры регуляторов)
	Реак- торы	РПН-СН	СК	РПН-СН	ЛР	3	4	6	7	8	10	11	
<i>РЕЖИМ МАКСИМАЛЬНЫХ НАГРУЗОК</i>													
1	0	230	0	121	38,5	90,8	24,6	194,5	218,8	9,96	507,8	510,6	При номин-х регулировочных ответвлениях
2	0	255	0	121	38,5	108,5	31,6	224,5	242,6	10,1	511,2	513,6	Крайнее отв. (7-9)
3	0	255	100	121	38,5	115,4	34,0	232,2	252,7	10,8	523,2	524,2	СК 100 Мвар
4	0	255	55,5	121	38,5	112,5	33,0	231,1	248,5	10,5	518,2	519,8	Фиксация $U_8=10,5$ кВ
5	0	255	55,5	121	44,28	112,6	38,0	231,4	248,5	10,5	518,2	519,8	Крайнее отв. на ЛР
6	0	255	55,5	127,72	44,28	118,8	38,0	231,3	248,5	10,5	518,2	519,8	+3 отв. на (3-5)
<i>РЕЖИМ МИНИМАЛЬНЫХ НАГРУЗОК</i>													
1	4	230	0	121	38,5	38,6	38,6	244,6	250,4	11,8	575,8	557,3	Включены 4 реактора
2	6	236,2	-43	121	38,5	107,6	32,9	212,9	220,4	10	469	484	6 реакторов и $U_8=10$ кВ
3	6	236,2	-43	123,4	40,81	109,7	34,9	212,9	220,4	10	496,5	484,6	+4 отв. на (3-5)

Примечания. При подборе параметров средств регулирования были приняты следующие условия и ограничения.

Для узла 3: $(115 < U < 123)$ кВ (из результатов лабораторной работы 2).

Для узла 4: $(37 < U < 38,5)$ кВ и $U = 35$ кВ (задано, соответственно в режиме максимальных и минимальных нагрузок).

Для узлов 6 и 7: $U < 252$ кВ (по условиям работы изоляции ЛЭП).

Для узла 8: $U = 10,5$ кВ и $U = 10$ кВ (соответственно в режиме максимальных и минимальных нагрузок).

Для узлов 10 и 11: $U < 525$ кВ (по условиям работы изоляции ЛЭП).

Лабораторная работа № 7

Оптимизация режима неоднородной электрической сети

Цель работы: Изучение методов снижения потерь мощности в неоднородной электрической сети.

Задание

Для электрической сети, обладающей свойством неоднородности, в заданном режиме найти оптимальное потокораспределение мощностей и уровни напряжений, соответствующие минимальным потерям мощности.

Краткие теоретические сведения.

Для повышения экономичности работы электрических сетей проводятся различные мероприятия по снижению потерь электроэнергии как на стадии эксплуатации, так и на стадии проектирования. На стадии эксплуатации выполняется оптимизация режимов работы с помощью различных методов, среди которых часто применяется оптимизация установившихся режимов по напряжению и перераспределению потоков мощности в неоднородных замкнутых сетях.

Средствами изменения уровней напряжений в основном являются трансформаторы с регулировочными ответвлениями (РПН) и источники реактивной мощности.

Перераспределение мощности в неоднородных замкнутых сетях также может достигаться трансформаторами с РПН и трансформаторами с продольно-поперечным регулированием, в которых напряжение изменяется не только по величине (модулю), но и по фазе. Включение в контур сети с параметрической неоднородностью БК устраняет неоднородность, но сопряжено с рядом технических трудностей.

Эффективным и практически не требующим вложения дополнительных средств является размыкание контуров электрической сети, что, однако, требует перемещения точки размыкания сети в зависимости от ее режима работы.

Рассмотрим влияние уровней напряжений в сети на потери мощности.

По известной формуле вычисления потерь мощности

$$\Delta P = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} R$$

видно, что для отдельного элемента сети с сопротивлением R повышение напряжения приводит к снижению потерь мощности. Однако в замкнутых сетях изменение напряжения, предположим с помощью трансформаторов, приводит также к перераспределению потоков мощности. Рассмотрим схему замкнутой электрической сети 220/110 кВ, рисунок 7.

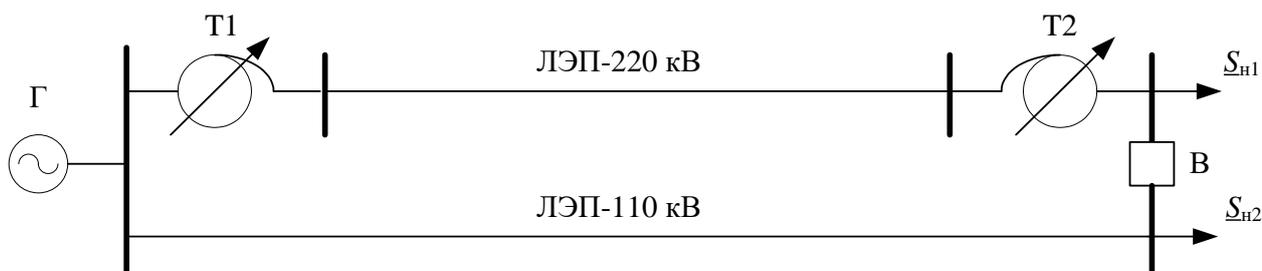


Рисунок 7 - Схема замкнутой электрической сети 220/110 кВ

В схеме имеется контур, в который входят трансформаторные подстанции Т1, Т2 и линии электропередачи ЛЭП-110, ЛЭП-220.

Если коэффициенты трансформации в контуре сети (см. рис.8) одинаковые, то контур имеет уравновешенные коэффициенты трансформации, т.е. произведение коэффициентов трансформации при обходе контура в каком либо направлении равно единице. Здесь под коэффициентом трансформации понимается отношение напряжения регулировочного ответвления стороны трансформатора, на которую осуществляется переход, к напряжению регулировочного ответвления стороны трансформатора, с которой переходят при обходе замкнутого контура. Для схемы на рис. 8 при номинальных напряжениях регулировочных ответвлений 230 и 121 кВ обоих трансформаторов при обходе по часовой стрелке с левого нижнего угла схемы (п.п.) имеем:

$$\frac{230}{121} \frac{121}{230} = 1.$$

Здесь первое отношение является коэффициентом трансформации для Т1: с шин 110 кВ на шины 220 кВ; второе отношение – коэффициент трансформации для Т2: с шин 220 кВ на шины 110 кВ.

В относительных единицах эти отношения для обоих трансформаторов равны единице.

Пусть напряжение на шинах 110 кВ трансформатора Т1 поддерживается неизменным (ПП). Изменим регулировочное ответвление на трансформаторе Т1 так, чтобы напряжение на шинах 220 кВ возросло. Это соответствует регулировочному ответвлению меньшему, чем 121 кВ (например, 118,58 кВ). Тогда при обходе контура имеем

$$\frac{230}{118,58} \frac{121}{230} = \frac{121}{118,58} > 1.$$

Такое рассогласование соответствует введению продольной ЭДС в контур по направлению, совпадающему с соответствующим направлением обхода контура по часовой стрелке и перераспределению мощности в сети.

В электрических сетях с преобладающим индуктивным сопротивлением для рассматриваемого случая введение продольной ЭДС в наибольшей степени изменяет (в данном случае увеличивает по ЛЭП 220 кВ и уменьшает по ЛЭП

110 кВ) поток реактивной мощности. Введение поперечной составляющей ЭДС наоборот в большей степени скажется на потоках активной мощности.

Таким образом, изменение коэффициентов трансформации в замкнутом контуре одновременно меняет напряжения и перераспределяет потоки мощности в ветвях схемы.

Другим эффективным способом снижения потерь мощности является размыкание контуров неоднородной замкнутой сети в точке экономического потоко раздела мощности (точке, где потоки мощности по подходящим ветвям направлены встречно друг к другу).

Метод покоординатного спуска

Для поиска оптимальных значений переменных, доставляющих минимум целевой функции, иногда используют метод покоординатного спуска, который относится к методам направленного поиска. Суть этого метода заключается в следующем.

Пусть x_1 и x_2 переменные, по которым осуществляется поиск, а $f(x_1, x_2)$ – целевая функция, подлежащая оптимизации.

Функция $f(x_1, x_2)$ вычисляется каждый раз, когда выбираются следующие значения x_1 и/или x_2 . Прежде всего, задаются начальными значениями $x_1^{(0)}$ и $x_2^{(0)}$ и вычисляется значение $f(x_1^{(0)}, x_2^{(0)})$. Изменим x_1 на величину некоторого шага $\Delta x_1^{(1)}$. Предположим, что мы увеличили x_1 , получим $x_1^{(1)} = x_1^{(0)} + \Delta x_1^{(1)}$. Вычислим $f(x_1^{(1)}, x_2^{(1)})$. Если это значение больше, чем $f(x_1^{(0)}, x_2^{(0)})$, то этот шаг бракуется и делается шаг в противоположном направлении $x_1^{(1)} = x_1^{(0)} - \Delta x_1^{(1)}$. Снова вычисляется $f(x_1^{(1)}, x_2^{(1)})$. Если оно меньше, чем $f(x_1^{(0)}, x_2^{(0)})$, то, очевидно, следует продолжать движение в данном направлении, уменьшая x_1 (координату x_1). Величина шага может при этом меняться. Движение по x_1 продолжается до тех пор, пока $f(x_1^{(i)}, x_2^{(i)})$ не перестанет уменьшаться или x_1 не достигнет своего предельно допустимого значения.

Затем x_1 остается неизменным и равным значению, при котором целевая функция достигла наименьшего значения, и начинает меняться x_2 (координата x_2) в направлении, соответствующем уменьшению целевой функции. Когда возможности x_2 будут исчерпаны, вновь переходят к изменению x_1 , а потом опять к изменению x_2 . Так поступают до тех пор, пока целевая функция продолжает уменьшаться. Процесс поиска прекращается, как только $f(x_1, x_2)$ уже невозможно уменьшить с помощью изменения x_1 и x_2 .

Если координат больше, чем две, то процесс поиска строится также, но поочередно меняются все имеющиеся переменные.

В задаче поиска минимума потерь мощности такими переменными (координатами) будут напряжения отпаек регулирующих трансформаторов и мощности шин, где производится размыкание замкнутых контуров. Целевой функцией являются суммарные потери мощности в схеме сети.

Указания к выполнению работы

1. В качестве метода оптимизации использовать направленный поиск – метод покоординатного спуска.

2. Вначале определить оптимальные значения коэффициентов трансформации (напряжения отпаяк трансформаторов), а затем разомкнуть контур с помощью выключателя В (рис. 9) и определить оптимальное потокораспределение в разомкнутой сети с помощью перераспределения мощности S_H между секциями шин нагрузки: S_{H1} и S_{H2} .

3. Все результаты расчетов по программе расчета установившегося режима рекомендуется сводить в таблицы, по которым можно построить процесс поиска и характерные зависимости (см. табл.5, 6)

4. Построить процесс пошагового поиска и зависимости потоков мощности по ЛЭП от изменяемых параметров. Процесс поиска лучше строить в координатах "шаги" – "целевая функция" с указанием успешных и неуспешных попыток. Пример процесса поиска дан на рис. 8 и 9.

5. При расчете следует контролировать изменение переменных (координат) и параметров режимов, в частности напряжений, значения которых не должны превышать максимально возможных рабочих значений и удовлетворять условиям регулирования напряжения.

Исходные данные

1. Принципиальная схема электрической сети.
2. Марки проводов ЛЭП и типы трансформаторов.
3. Мощности нагрузки S_H .
4. Напряжение пункта питания.



Рисунок 8 - Диаграмма поиска оптимальных отпаяк трансформаторов Т1 и Т2

Процесс поиска оптимальной мощности узла 4

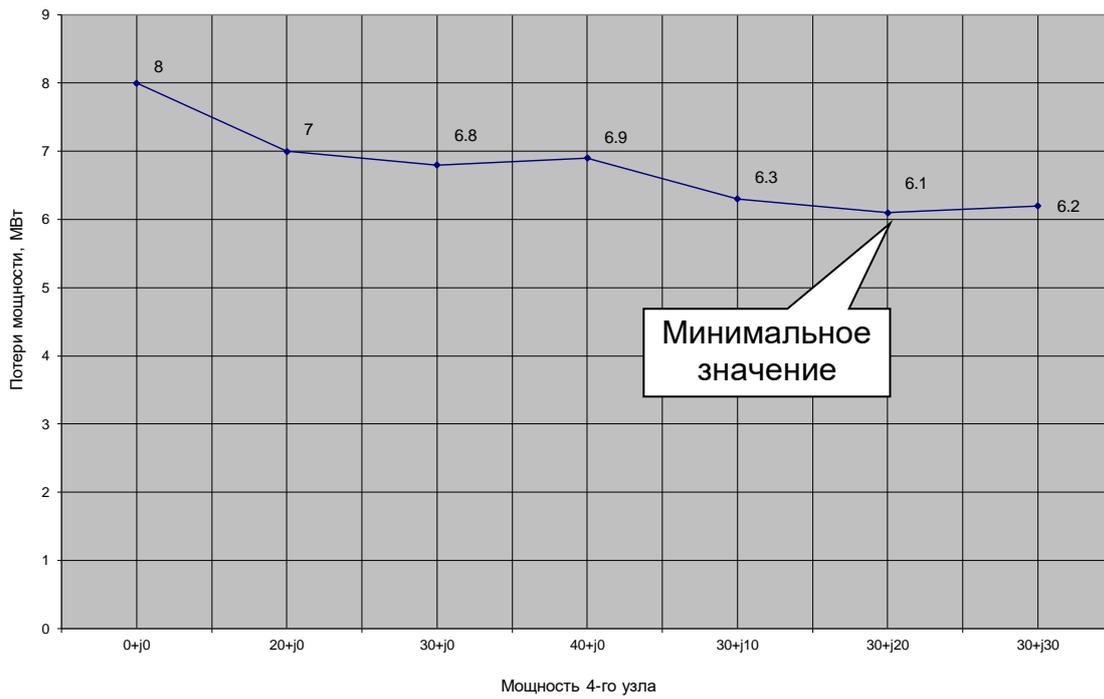


Рисунок 9 - Диаграмма поиска оптимальной мощности узла 4

Таблица 5 -Протокол поиска оптимальных значений отпаек РПН трансформаторов 1 и 2

$U_1 = 121$ кВ, $P_4 = 200$ МВт, $Q_4 = 120$ Мвар; меняются номера отпаяк T_1 и T_2 (N_1, N_2); диапазон регулирования ± 6

№ п/п	U_2 , кВ	U_3 , кВ	U_4 , кВ	P_{1-4} , МВт	Q_{1-4} , МВт	P_{1-2} , МВт	Q_{1-2} , МВт	ΔP , МВт	$\Delta Q-Q_c$, Мвар	Номера отпаяк	Примечания
1	219,5	206,7	102,4	111,1	42,6	104,3	99,4	15,5	22,0	(0,0)	Исходный режим
2	215,4	203	100,6	115,2	50,2	101,6	94,0	16,8	24,1	(+1,0)	Не успешно
3	223,8	210,6	104,2	107,0	34,9	107,3	105,3	14,3	20,2	(-1,0)	Успешно
4	248	232,2	114,1	84,6	-8,2	125,8	144,1	10,4	15,9	(-6,0)	Успешно
5	242,8	227,5	111,9	89,3	1	121,5	134,9	10,8	16,0	(-5,0)	Не успешно
6	248,8	233,7	112,9	85,7	-2,7	124,5	135,6	10,2	12,9	(-6,-1)	Успешно
7	252,6	241	106,5	93,7	28,2	117,8	94,4	11,0	2,6	(-6,-6)	Ограничение на U_2
8	251,9	239,6	107,9	91,4	21,5	119,2	102,4	10,6	4,0	(-6,-5)	Не успешно
9	251,1	238,2	109,3	89,8	15,1	120,5	110,6	10,3	5,7	(-6,-4)	Не успешно
10	250,3	236,7	110,5	88,3	8,9	121,9	118,9	10,2	7,8	(-6,-3)	Без изменений
11	249,6	235,2	111,8	86,9	3	123,2	127,2	10,2	10,2	(-6,-2)	Без изменений

Таблица 6 - Протокол поиска оптимальных значений мощностей при разделении схемы по шинам узла 4 ($U_1 = 121$ кВ, $S_4 + S_5 = 200 + j120$ МВ·А); на трансформаторах установлены оптимальные регулировочное ответвление

№ п/п	U_2 , кВ	U_3 , кВ	U_4 , кВ	U_5 , кВ	P_{1-4} , МВт	Q_{1-4} , МВт	P_{1-2} , МВт	Q_{1-2} , МВт	ΔP , МВт	$\Delta Q-Q_c$, Мвар	Мощность S_4 , МВ·А	Примечание
1	245,8	227,0	121,7	106,7	0	-7,8	208,0	170,8	8,0	43,1	$0 + j0$	Исходный режим
2	247	229,6	119,5	108,4	20,4	-7,1	186,6	156,7	7,0	29,6	$20 + j0$	Успешно
3	247,6	230,7	118,4	109,1	30,8	6,2	176,0	150,4	6,8	24,4	$30 + j0$	Успешно
4	248,1	231,8	117,5	109,8	41,5	-5	165,4	144,6	6,9	19,6	$40 + j0$	Не успешно
5	249,0	233,5	116,5	111,2	30,9	4	175,5	134,5	6,3	18,5	$30 + j10$	Успешно
6	250,4	236,2	114,6	113,3	31	14	175,0	119,4	6,1	14,0	$30 + j20$	Успешно
7	251,8	238,7	112,6	115,2	31,6	25,5	174,6	105,0	6,2	10,5	$30 + j30$	Не успешно

Вопросы к защите.

1. Какие мероприятия по снижению потерь электрической энергии применяют в электрических сетях для снижения потерь активной мощности?
2. Какие существуют способы снижения потерь активной мощности в неоднородных электрических сетях? Какие технические средства при этом используются?
3. На перераспределение потоков какой мощности в большей степени оказывает влияние продольное и поперечное регулирование напряжения в неоднородных замкнутых электрических сетях?
4. Можно ли снизить потери мощности простым отключением линии 110 кВ?
5. При каких условиях потери в неоднородной сети будут минимальными?
6. Какие ограничения следует учитывать при оптимизации режима электрической сети?
7. Пояснить способ поиска оптимального режима неоднородной электрической сети.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Быстрицкий Г.Ф. Основы энергетики. – М.: КноРус, 2013.-278 с. ил.
2. Герасименко А.А. Передача и распределение электрической энергии. – М.:КноРус, 2015.-724 с. ил.
3. Кудрин Б.И. Электроснабжение. – М.: Академия, 2013.-672 с. ил.
4. Кудрин Б.И. Электроснабжение. – М.: Академия, 2013.-672 с. ил.
5. Шаров Ю.В. Электроэнергетика. – М.: Инфра-М, 2014.-384 с. ил.
6. Кудинов А.А. Тепловые электрические станции. Схемы и оборудование: Учебное пособие. – М.:Инфра-М, 2015. – 376 с. ил.
7. Грунтович Н.В. Монтаж, наладка и эксплуатация электрооборудования. – М.:Инфра-М, 2013. – 271 с. ил.
8. Анчарова Т.В. Электроснабжение и электрооборудование зданий и сооружений: Учебник. – М.:Инфра-М, 2014. – 416 с. ил.
9. Сибикин Ю.Д. Технология энергоснабжения: Учебник – 3-е изд., перераб. и доп. – М.:Форум, 2015. – 352 с. ил.
10. Сибикин Ю.Д. Электрические подстанции. – М.:РадиоСофт, 2014. – 141 с. ил.
11. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии/ под ред. В.В. Денисова. – М.:Феникс, 2015. – 382 с. ил.
12. Шабад В.К. Электромеханические переходные процессы в электроэнергетических системах. – М.:Академия, 2013. – 193 с. ил.
13. Сибикин Ю.Д., Сибикин М.Ю. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. – М.:КноРус, 2014. – 240 с. ил.
14. Важов В.Ф. Техника высоких напряжений: Учебник. – М.:Инфра-М, 2014. – 264 с. ил.
15. Ушаков В.Я. Электроэнергетические системы и сети. – М.:Юрайт, 2014. – 446 с. ил.
16. Климова Г.Н. Электроэнергетические системы и сети. Энергосбережение. 2-е изд. – М.:Юрайт, 2014. – 179 с. ил.
17. Бачаров Ю.Н. Техника высоких напряжений. –М.:Юрайт, 2014. – 264 с. ил.
18. Хрущев Ю.В. Электроэнергетические системы и сети. Электрические переходные процессы. – М.:Юрайт, 2014. – 153 с. ил.
19. Исмагилов Ф.Р. Основные вопросы проектирования воздушных линий электропередач: Учебное пособие. – М.:Машиностроение, 2015. – 211 с. ил.
20. Фролов Ю.М., Шелякин В.П. Основы электроснабжения. – СПб.:Лань, 2013. – 432 с. ил.
21. Почаевец В.С. Электрические подстанции: Учебник. – М.:Маршрут, 2012. – 492 с. ил.

Лабораторная работа 4

1. При построении зависимостей напряжения, потерь мощности и др. от передаваемой мощности по линии необходимо выбрать диапазон изменения активной мощности. Как это сделать? Какие промежуточные значения в этом диапазоне взять для проведения опытов?

Задана мощность режима максимальных нагрузок – это верхнее значение диапазона. Нижнее значение, если оно не оговорено преподавателем, следует взять 40...50 % от мощности режима максимальных нагрузок. Всего следует сделать 4-5 опытов, располагая значения мощности через примерно одинаковый интервал.

2. Какую реактивную мощность нужно задавать при проведении опытов?

Во всех случаях, когда требуется задать значение реактивной мощности, оно определено условиями проведения опытов. Это либо заданное значение коэффициента реактивной мощности, либо выбранное значение мощности компенсации. В режиме холостого хода $Q_2 = 0$.

3. В эксперименте с компенсацией реактивной мощности неясно, какую величину реактивной мощности требуется скомпенсировать.

Компенсация реактивной мощности приводит к снижению передаваемой реактивной мощности по линии. Увеличивая мощность компенсации, мы снижаем эту мощность и разгружаем линию по реактивной мощности. При этом потери активной мощности в линии снижаются. Можно полностью скомпенсировать реактивную мощность в конце линии. В работе следует провести несколько опытов, постепенно уменьшая мощность в конце линии (увеличивая мощность компенсации) до тех пор, пока потери активной мощности в линии не начнут снова возрастать. Минимальные потери активной мощности не всегда соответствуют нулевой мощности в конце линии (полная компенсация). Чтобы заметить это, следует взять точки опытов вблизи минимума потерь чаще, чем в других случаях.

4. Какой диапазон изменения напряжений по концам линии следует взять при построении зависимостей передаваемой мощности от модуля и фазы напряжения?

Напряжение в начале линии во всех опытах берется одним и тем же.

Напряжение в конце может изменяться в допустимых пределах, обусловленных нормальным режимом работы линии. Верхнее значение равно максимально допустимому значению рабочего напряжения линии. Нижнее значение, как правило, берут не ниже –10 % от номинального напряжения.

$U_{\text{ном}}$, кВ	35	110	150	220	330	500	750	1150
U_{max} , кВ	40,5	126	172	252	363	525	787	1200

Фаза напряжения в конце линии при передаче активной мощности от начала линии к ее концу почти всегда отрицательна (вектор напряжения в конце

отстает от вектора напряжения в начале линии). Диапазон изменения фазы напряжения в конце линии зависит от длины линии. Для коротких линии он менее 10 градусов, для линии в несколько сот километров он достигает 20...40 градусов и более. Значения фазы напряжения удобно подбирать опытным путем.

Лабораторная работа 5

1. Как подбирать регулировочные ответвления?

Регулировочные ответвления имеют напряжения. Их надо вычислить по заданному типу РПН трансформатора. Так, например, если имеется РПН $\pm 6 \times 1,5\%$, то всего имеем 13 ответвлений: 6 в одну сторону (уменьшения), 6 – в другую (увеличения) и одно ответвление номинальное. Его напряжение равно номинальному напряжению обмотки трансформатора, в которую включено устройство РПН. Если номинальное напряжение обмотки с РПН равно 121 кВ, то для вычисления всех напряжений ответвлений определяется шаг напряжения ответвления. Это 2 % в нашем случае или 2,42 кВ (два процента от 121 кВ). В сторону уменьшения напряжения ответвления имеем $121 - 2,42 = 118,58$; $121 - 2 \cdot 2,42 = 116,16 \dots 121 - 6 \cdot 2,42 = 106,48$ кВ. В сторону увеличения напряжения ответвлений получаются так же, но с суммированием добавки напряжения. В работе следует подбирать номера или напряжения регулировочных ответвлений так, чтобы получить требуемое (желаемое) напряжения в точке регулирования.

2. Как определить требования к диапазону изменения напряжения на шинах питающей подстанции?

Здесь требуется определить допустимый диапазон изменения напряжения на шинах питающей подстанции, в котором основная электрическая сеть энергосистемы должна поддерживать рабочее напряжение.

В этом эксперименте регулировочные ответвления подбирать не следует. Необходимо установить то крайнее регулировочное ответвление РПН, которое даст наибольшее повышение (понижение) напряжение на шинах 10 кВ понижающей подстанции.

В режиме максимальных нагрузок на шинах 10 кВ понижающей подстанции имеется угроза появления пониженного напряжения. Поэтому, используя предельные возможности РПН для повышения напряжения (установление крайнего отрицательного ответвления), будем снижать напряжение в ЦП до тех пор, пока напряжение на шинах 10 кВ не станет равным желаемому значению в этом режиме. Это и будет нижняя граница допустимого диапазона напряжения. Верхняя граница диапазона определяется из предположения, что напряжение в ЦП настолько велико, что для поддержания на шинах 10 кВ понижающей подстанции требуется выведение регулятора РПН в противоположное крайнее положение (установление крайнего положительного ответвления). В этом случае будем повышать напряжение в ЦП до тех пор, пока напряжение на

шинах 10 кВ понижающей подстанции не станет равным желаемому напряжению.

Как правило, ограничение на максимально возможное значение напряжения в ЦП не позволят неограниченно повышать напряжение и поэтому верхней границей допустимого диапазона напряжения в ЦП будет предельное рабочее напряжения для данного номинального напряжения.

В режиме минимальных нагрузок границы допустимого диапазона находятся аналогично, но с другим желаемым напряжением.

3. В чем особенности регулирования напряжения в послеаварийном режиме?

Послеаварийный режим является более тяжелым по отношению к нормальному режиму. Предполагается, что авария произошла в то время, когда энергосистема проходила максимум нагрузки. Как правило, уровни напряжения в послеаварийном режиме становятся очень низкими и поэтому важно знать смогут ли устройства регулирования обеспечить требуемые значения напряжений в заданных точках сети. В тех случаях, когда с помощью имеющихся средств не удастся поднять уровни напряжения, используют крайние меры – отключение части потребителей, тем самым снижая нагрузку элементов сети.

В отдельных случаях используют дополнительные средства регулирования напряжения – компенсирующие устройства.

Лабораторная работа 6

1. В схеме электрической сети имеется три трансформатора с устройством РПН. С какого трансформатора нужно начать подбор регулировочных ответвлений?

Начинать подбор регулировочных ответвлений следует с тех трансформаторов, которые могут изменять напряжение во всей сети или с большей ее части. Такими трансформаторами в схеме работы являются автотрансформаторы подстанции с высшим напряжением 500 кВ. Их влияние распространяется на всю сеть 220-110-35 кВ. Но прежде нужно убедиться в том, что в сети 500 кВ уровни напряжений не превышают максимально возможных рабочих значений, и при необходимости включить или отключить ШР на ЛЭП-500 кВ.

Следует иметь ввиду, что регулирование напряжения в системообразующей электрической сети должно не только удовлетворять требованиям нормальной работы сетевого оборудования, но и предоставлять возможности средствам регулирования распределительных сетей обеспечивать регулирование напряжений в требуемых диапазонах. Примером тому является наличие требований к допустимому диапазону изменения напряжения на шинах 110 кВ подстанции 220/110/35, которые были получены в лабораторной работе 2.

Вообще процесс подбора регулировочных ответвлений выполняется в несколько приближений и после первого прохода по подбору ответвлений, возможно, потребуется откорректировать ранее выбранные ответвления.

2. Когда «включить» в работу автоматическое регулирование мощности синхронного компенсатора на подстанции 500/220/10 кВ?

«Включить», т.е. зафиксировать в расчетной модели сети напряжение на шинах 10 кВ, где установлен СК, следует сразу, как только начался процесс подбора регулировочных ответвлений на трансформаторах этой подстанции, так как мощность компенсации изменит потокораспределение реактивной мощности в сети и, следовательно, уровни напряжения во всей прилегающей сети. Как только расчет показывает требуемую мощность СК больше допустимой (номинальной), следует зафиксировать не напряжение, а предельную мощность СК.

Лабораторная работа 7

1. Как найти оптимальное потокораспределение мощностей в схеме замкнутой электрической сети?

Поиск осуществляется методом перебора вариантов с различными положениями регуляторов РПН автотрансформаторов схемы или мощностями нагрузки двух секций шин при разомкнутом режиме работы сети. Алгоритм метода перебора изложен в методических указаниях к работе.

2. При выполнении второй части работы, когда находится оптимальное потокораспределение в разомкнутой сети, необходимо ли возвращаться в исходное состояние по регулировочным ответвлениям трансформаторов?

Да, установите коэффициенты трансформации на номинальные значения. Найдите оптимальное потокораспределение мощностей в разомкнутой сети и оцените эффект от снижения потерь, но этот эффект следует оценивать относительно режима работы сети в замкнутом режиме. Посмотрите самый первый расчет замкнутой электрической сети: сколько передается мощности по линии 110 кВ и сколько по сети 220 кВ через автотрансформаторы? Эти значения будут исходными в подборе мощностей секций шин 110 кВ сети в разомкнутом режиме.

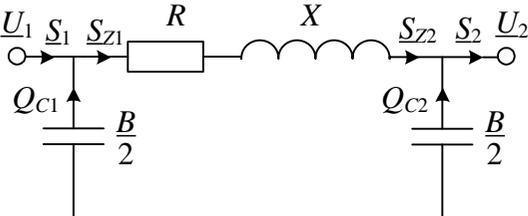
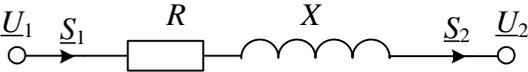
После определения оптимального режима работы разомкнутой сети следует посмотреть, насколько дополнительно снижаются потери от изменения коэффициентов трансформации автотрансформаторов сети 220 кВ.

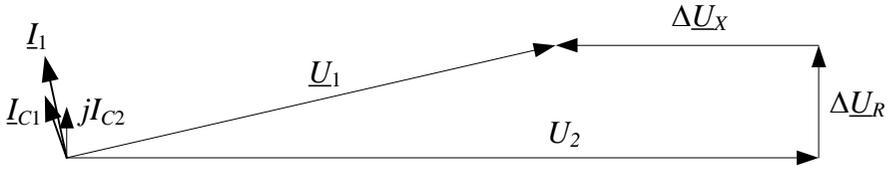
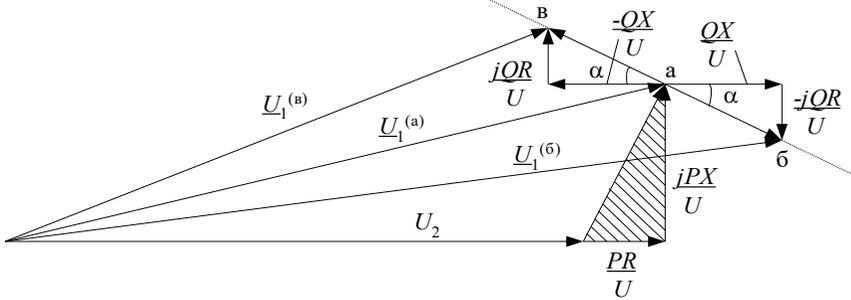
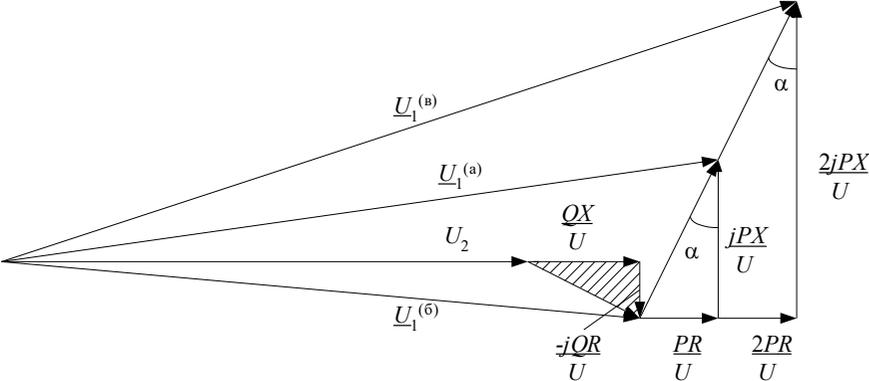
Очевидно, что изменение регулировочных ответвлений на автотрансформаторах не приведет к изменению потерь мощности в сети 110 кВ. Поэтому, изменяя ответвления мы попросту имеем эффект снижения (увеличения) потерь от изменения уровня напряжения в сети 220 кВ. Никакого перераспределения мощностей между линиями 110 и 220 кВ не происходит.

3. Какой шаг в изменении мощностей нагрузок секций шин следует взять?

Выбирая большой шаг вы рискуете пропустить оптимальное потокораспределение. Маленький шаг увеличит количество расчетов. Возьмите шаг равный примерно 10 % от общей мощности нагрузки, а в той области, где может находиться оптимальное решение, сделайте несколько дополнительных расчетов.

Приложение 3. Математические модели и основные соотношения ЛЭП

Наименование	Модель или соотношение	Комментарии
П-образная схема замещения ЛЭП		Наиболее широко применяется при моделировании и расчетах электрических сетей.
Упрощенная схема замещения ЛЭП		Используется для моделирования ЛЭП до 35 (иногда 110) кВ. Может быть использована для объяснения зависимостей напряжения в конце линии и потерь активной мощности от передаваемой мощности.
Потери активной мощности	$P_1 - P_2 = \Delta P;$ $\Delta P = \frac{P_{Z1}^2 + Q_{Z1}^2}{U_1^2} R = \frac{P_{Z2}^2 + Q_{Z2}^2}{U_2^2} R$	Разность активных мощностей по концам линии. Здесь является нагрузочными потерями.
Потери реактивной мощности и зарядная мощность	$Q_1 - Q_2 = \Delta Q - Q_c = \Delta Q - Q_{c1} - Q_{c2};$ $\Delta Q = \frac{P_{Z1}^2 + Q_{Z1}^2}{U_1^2} X = \frac{P_{Z2}^2 + Q_{Z2}^2}{U_2^2} X;$ $Q_{c1} = \frac{B}{2} U_1^2; Q_{c2} = \frac{B}{2} U_2^2$	Разность реактивных мощностей по концам линии. Является разностью потерь реактивной мощности и зарядной мощностью в линии.
Падение напряжения	$\underline{U}_1 - \underline{U}_2 = \Delta \underline{U};$ $\Delta \underline{U} = \frac{P_{Z1} R + Q_{Z1} X}{U_1} + j \frac{P_{Z1} X - Q_{Z1} R}{U_1};$ $\Delta \underline{U} = \frac{P_{Z2} R + Q_{Z2} X}{U_2} + j \frac{P_{Z2} X - Q_{Z2} R}{U_2}.$	Разность векторов напряжений по концам линии – векторная величина.
Потеря напряжения	$ \underline{U}_1 - \underline{U}_2 = \Delta U$	Разность значений (модулей) напряжений по концам линии – скалярная величина.

<p>Векторная диаграмма режима холостого хода линии</p>		<p>Напряжение в конце линии больше, чем в начале. По линии протекает зарядный ток.</p>
<p>Векторная диаграмма вариации реактивной мощности и неизменной активной мощности</p>		<p>На диаграмме для трех значений реактивной мощности построены три вектора напряжения в начале линии. Изменение реактивной мощности в конце в большей степени влияет на соотношение между модулями векторов напряжений и в меньшей степени на угол между ними.</p>
<p>Векторная диаграмма вариации активной мощности и неизменной реактивной мощности</p>		<p>На диаграмме для трех значений передаваемой активной мощности построены три вектора напряжения в начале линии. Изменение передаваемой активной мощности по линии в большей степени влияет на угол между векторами напряжений и в меньшей мере на разность модулей этих векторов.</p>

<p>Векторная диаграмма вариации полной мощности при неизменном коэффициенте реактивной мощности</p>		<p>На диаграмме для трех значений полной мощности построены три вектора напряжения в начале линии. С ростом мощности величина падения напряжения увеличивается пропорционально току по линии.</p>
<p>Натуральная мощность линии</p>	$P_{\text{нат}} = \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{Z_C}, \text{ где } Z_C = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} - \text{волновое сопротивление линии}$	<p>Мощность, при которой нет отраженной волны тока и напряжения от нагрузки в конце линии. При передаче натуральной мощности потери реактивной мощности равны зарядной мощности линии.</p>
<p>Компенсация реактивной мощности в линии</p>	$U_2 = U_1 - \frac{P_2 R + (Q_2 - Q_{KV}) X}{U_2} - j \frac{P_2 X - (Q_2 - Q_{KV}) R}{U_2};$ $\Delta P = \frac{P_2^2 + (Q_2 - Q_{KV})^2}{U_2^2} R$	<p>Компенсация реактивной мощности влияет на составляющие падения напряжения и, как правило, направлена на повышение напряжения в конце линии. Потери мощности снижают путем компенсации реактивной мощности в линии.</p>

Лабораторная работа 1. Исследование режимов работы ЛЭП 220 кВ

Цель работы

Изучение режимов работы линии электропередачи (ЛЭП) путем проведения вычислительного эксперимента на ЭВМ.

Задание

1. Построить зависимость напряжения в конце ЛЭП (U_2) и потерь активной мощности (ΔP) от мощности нагрузки. Выяснить влияние реактивной мощности нагрузки на полученные зависимости, для чего выполнить эксперименты при коэффициенте реактивной мощности нагрузки $\text{tg}(\varphi) > 0$, $\text{tg}(\varphi) = 0$ и $\text{tg}(\varphi) < 0$.

Построить зависимость соотношения зарядной мощности и потерь реактивной мощности ЛЭП от передаваемой мощности во всех рассматриваемых случаях.

2. Провести анализ режима холостого хода ЛЭП.
3. Исследовать зависимости напряжения в конце ЛЭП и потерь активной мощности в ЛЭП от величины компенсации реактивной мощности нагрузки.
4. Исследовать влияние величин векторов напряжений по концам ЛЭП и угла между ними на передаваемую активную и реактивную мощность.
5. Построить область допустимых режимов работы ЛЭП (в координатах P_2, Q_2).

Электрическая схема



Исходные данные

ЛЭП 220 кВ, 2 цепи, провод марки АС240/32, $l = 80$ км.
Погонные параметры фазы ЛЭП: $r_0 = 0,121$ Ом/км, $x_0 = 0,435$ Ом/км, $b_0 = 2,6$ мкСм/км.

Максимально допустимый ток по проводу АС240/32 $I_{\text{max}} = 605$ А.

Номинальное напряжение ЛЭП $U_{\text{ном}} = 220$ кВ.

Напряжение в начале ЛЭП $U_1 = 232$ кВ.

Мощности режима максимальных нагрузок: $P_{\text{max}} = 240$ МВт, $Q_{\text{max}} = 120$ Мвар.

Предельно допустимые уровни напряжений в ЛЭП: $U_{\text{min}} = 190$ кВ, $U_{\text{max}} = 252$ кВ.

Расчетные параметры

Предельно допустимый ток по фазе двухцепной ЛЭП $I_{\max} = 1210$ А.

Параметры фазы двухцепной ЛЭП: $R = 4,86$ Ом, $X = 17,4$ Ом, $B = 416$ мкСм.

Результаты исследований

1. Режимы нагрузки

Исследования проводятся при трех значениях коэффициента реактивной мощности: $\operatorname{tg}\varphi = 0,5$; 0; $-0,5$.

Для каждого значения коэффициента выполняем 4 опыта для следующих мощностей нагрузок: 120, 160, 200 и 240 МВт.

Результаты измерений в опытах, выполняемых с помощью программы NetLab, записываем в таблицы 1, 2 и 3.

а) $\operatorname{tg}\varphi = 0,5$

Таблица 1

№ п/п	P_2	Q_2	P_1	Q_1	U_2	$P_1 - P_2$	$Q_1 - Q_2$
1	120	60	121,6	43,9	225,5	1,6	-46,1
2	160	80	162,9	69,1	222,8	2,9	-10,9
3	200	100	204,8	95,9	220,1	4,8	-4,1
4	240	120	247,2	124,7	217,2	7,2	4,7

б) $\operatorname{tg}\varphi = 0$

Таблица 2

№ п/п	P_2	Q_2	P_1	Q_1	U_2	$P_1 - P_2$	$Q_1 - Q_2$
1	120	0	121,3	-17,4	230,1	1,3	-17,4
2	160	0	162,4	-13,6	229,1	2,4	-13,6
3	200	0	203,7	-8,6	228,1	3,7	-8,6
4	240	0	245,4	-2,4	227,0	5,4	-2,4

в) $\operatorname{tg}\varphi = -0,5$

Таблица 3

№ п/п	P_2	Q_2	P_1	Q_1	U_2	$P_1 - P_2$	$Q_1 - Q_2$
1	120	60	121,7	-76,5	234,6	1,7	-16,5
2	160	80	163,0	-92,0	235,1	3,0	-12,0
3	200	100	204,6	-106,3	235,5	4,6	-6,3
4	240	120	246,5	-119,3	235,9	6,5	0,7

Данные таблиц 1 – 3 представим в виде графических зависимостей.

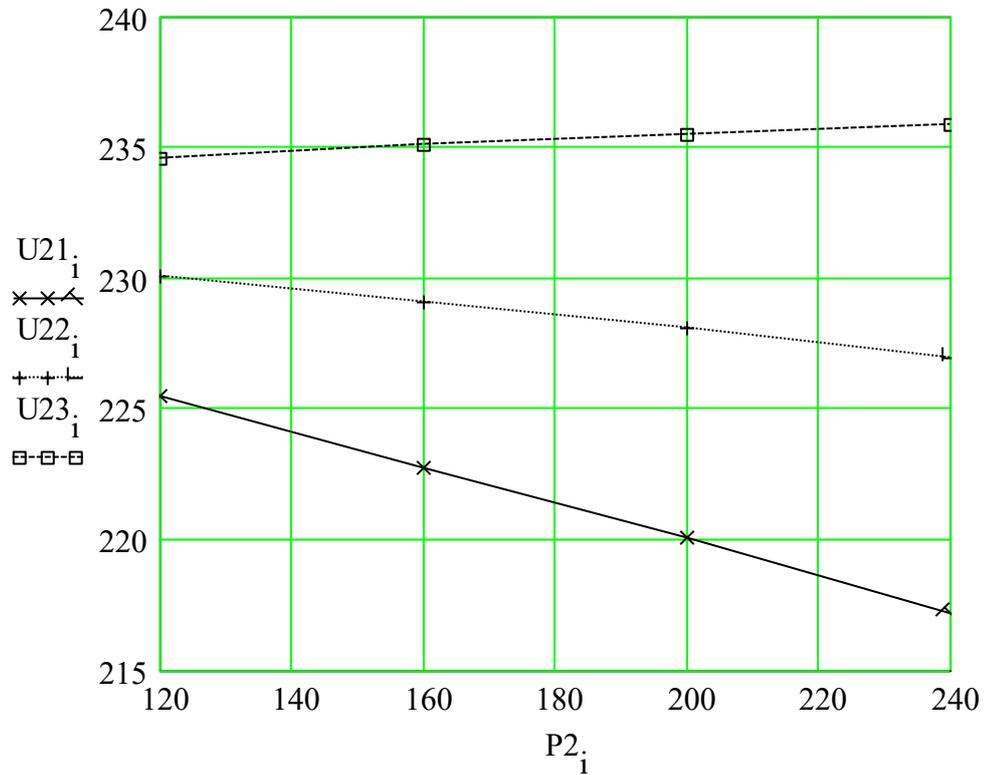


Рис. 1. Зависимости напряжения линии U_2 от мощности нагрузки P_2 при коэффициентах реактивной мощности 0,5 (1); 0 (2) и $-0,5$ (3)

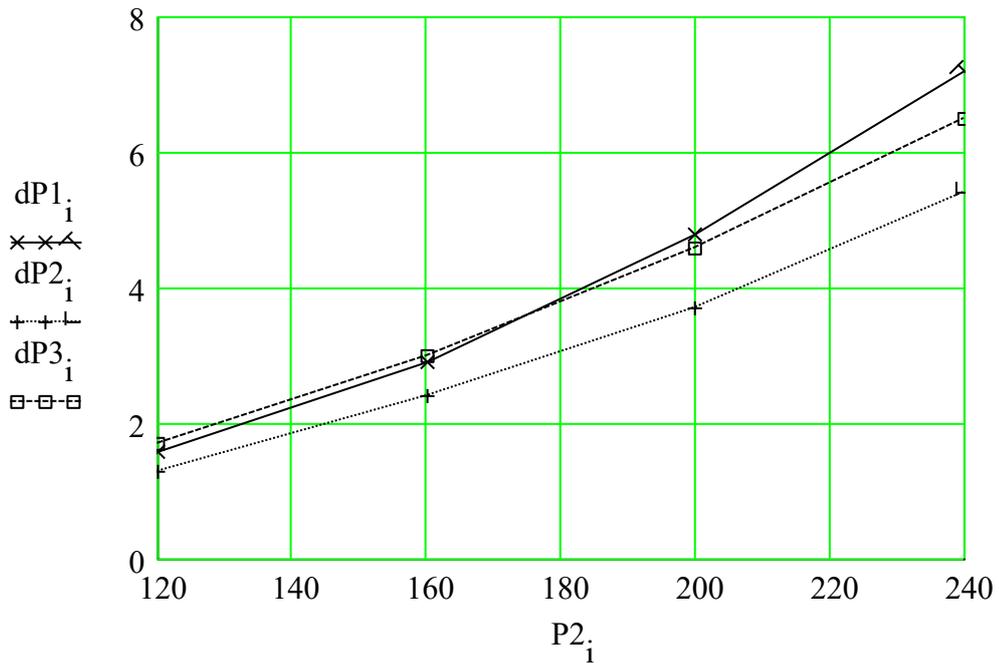


Рис. 2. Зависимости потерь активной мощности ΔP от мощности нагрузки P_2 при коэффициентах реактивной мощности 0,5 (1); 0 (2) и $-0,5$ (3)

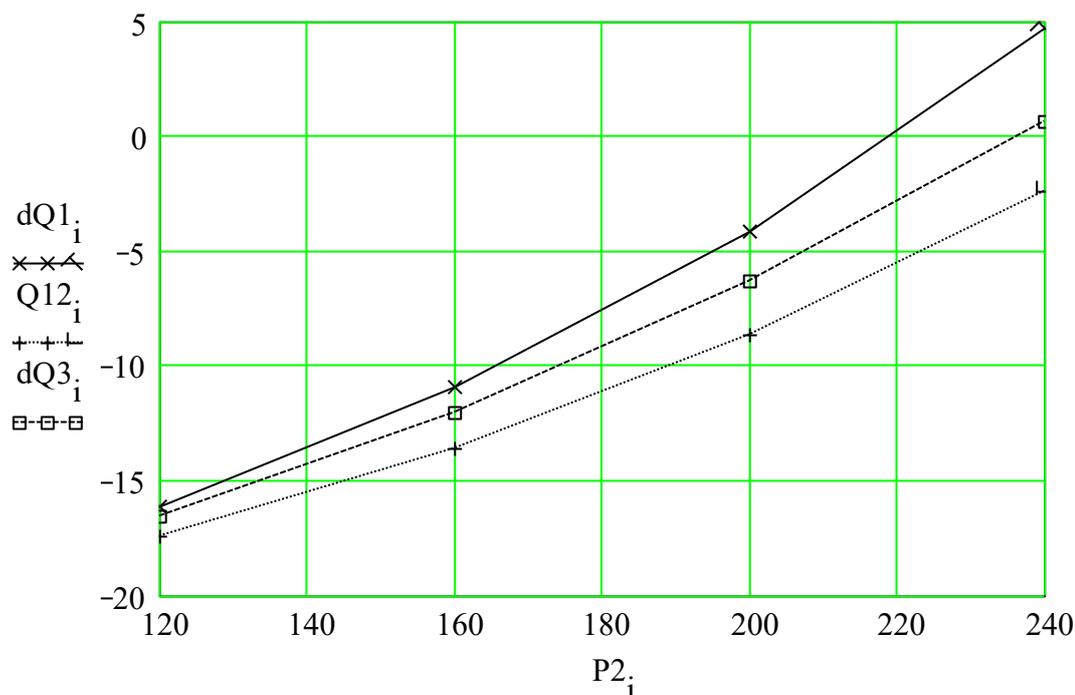


Рис. 3. Соотношение потерь реактивной мощности и зарядной мощности ЛЭП в зависимости от мощности нагрузки при коэффициентах реактивной мощности 0,5 (1); 0 (2) и -0,5 (3)

Выводы

1. Напряжение в конце линии понижается с ростом мощности нагрузки при положительном и нулевом коэффициенте реактивной мощности. При отрицательном коэффициенте реактивной мощности напряжение слабо растет.
2. Потери мощности в ЛЭП увеличиваются с ростом нагрузки. Наименьшие потери имеют место при нулевой реактивной мощности в конце ЛЭП
3. Соотношение потерь реактивной мощности и зарядной мощности ЛЭП зависит от передаваемой мощности:
 - а) при малой загрузке ЛЭП зарядная мощность больше потерь, но с ростом мощности нагрузки их разность уменьшается;
 - б) при определенном значении передаваемой мощности потери мощности полностью компенсируются зарядной мощностью, например для коэффициента реактивной мощности 0,5 это происходит при мощности 220 МВт;
 - в) при коэффициенте реактивной мощности, равном нулю, имеет место наибольший избыток зарядной мощности ЛЭП.
4. По графику соотношения потерь реактивной мощности и зарядной мощности находим примерное значение натуральной мощности ЛЭП – это точка пересечения кривой для $\text{tg}\varphi = 0$ с осью абсцисс: 237 МВт. Для двухцепной ВЛ номинального напряжения 220 кВ эта величина составляет примерно 240 МВт.

2. Режим холостого хода

При холостом ходе активная и реактивная мощности в конце ЛЭП равны нулю. Напряжение в конце ЛЭП, полученное из опыта, равно 232,8 кВ, что больше напряжения в начале на 0,8 кВ.

Ток в начале ЛЭП не равен нулю и составляет 55,7 А.

3. Режим компенсации реактивной мощности нагрузки

Построим зависимости напряжения в конце ЛЭП и потерь активной мощности в ЛЭП от мощности компенсации нагрузки (мощности компенсирующего устройства).

Представим расчетные значения Q_{k1} , Q_2 , P_1 , Q_1 и U_2 в виде векторов и построим по ним искомые зависимости:

$$\begin{array}{l}
 \text{I :- } 1..6 \\
 \text{--- } Q_{k1} \text{ :- } \begin{bmatrix} 0 \\ 40 \\ 80 \\ 120 \\ 160 \\ 200 \end{bmatrix} \quad
 Q_2 \text{ :- } \begin{bmatrix} 120 \\ 80 \\ 40 \\ 0 \\ -40 \\ -80 \end{bmatrix} \quad
 P_1 \text{ :- } \begin{bmatrix} 247.2 \\ 246.2 \\ 245.7 \\ 245.4 \\ 245.5 \\ 245.9 \end{bmatrix} \quad
 q_1 \text{ :- } \begin{bmatrix} 124.7 \\ 81.7 \\ 38.7 \\ -21.4 \\ -42.4 \\ -81.3 \end{bmatrix} \quad
 U_2 \text{ :- } \begin{bmatrix} 217.2 \\ 220.5 \\ 223.8 \\ 226.9 \\ 230.0 \\ 233.0 \end{bmatrix}
 \end{array}$$

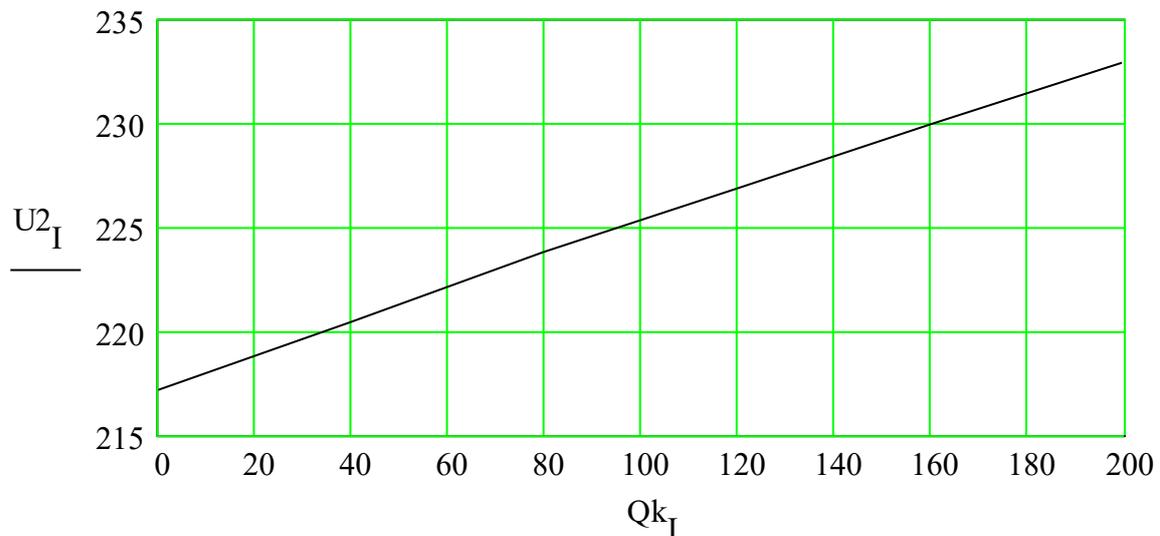


Рис. 4. Напряжение в конце ЛЭП в зависимости от мощности компенсации нагрузки

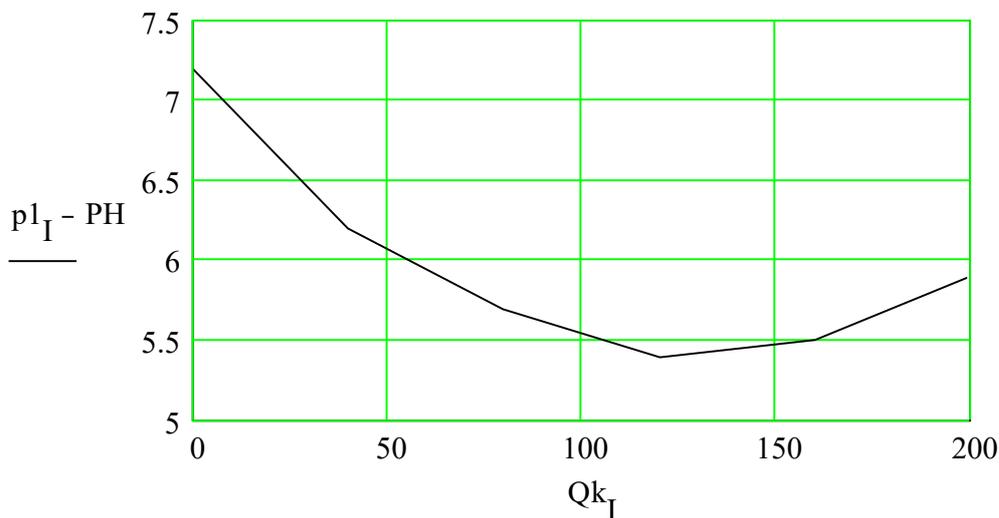


Рис. 5. Потери активной мощности в ЛЭП в зависимости от мощности нагрузки

Выводы

1. С увеличением мощности компенсации нагрузки напряжение в конце ЛЭП увеличивается (рис. 4).
2. С изменением мощности компенсации нагрузки потери в ЛЭП изменяются и достигают минимального значения при мощности компенсации 120 Мвар (рис. 5).

5. Исследование влияния величин векторов напряжений по концам ЛЭП и угла между ними на передаваемую активную и реактивную мощность.

Зависимости P_2 и Q_2 построим от величины напряжения в конце линии U_2 при неизменном напряжении в начале линии и фазе между напряжениями по концам линии.

Напряжение в начале линии $U_1 = 232$ кВ и $\delta = -5$ град. – выбран произвольно.

Построим таблицу зависимости P_2 и Q_2 от U_2 . Диапазон изменения U_2 выберем от -15 до $+15$ % от номинального напряжения с шагом 5 % (11 кВ).

Таблица 4

Номер опыта	Напряжение U_2 , кВ	Мощность P_2 , МВт	Мощность Q_2 , Мвар
1	187	324,4	390,8
2	198	311,1	298,1
3	209	294,1	192,6
4	220	273,6	74,2
5	231	249,4	-57,0
6	242	221,6	-201,1
7	252	193,3	-343,2

По табличным значениям строим графики P_2 и Q_2 от величины напряжения в конце линии U_2 (рис.6).

Аналогично для P_2 и Q_2 от величины угла между напряжениями по концам линии.

Напряжение в начале линии $U_1 = 232$ кВ. Напряжение в конце примем произвольно $U_2 = 225$ кВ. Угол δ будем изменять от некоторого отрицательного

значения – передача мощности от начала линии к концу и до плюс одного градуса – небольшое опережение вектора \underline{U}_2 относительно вектора \underline{U}_1 .

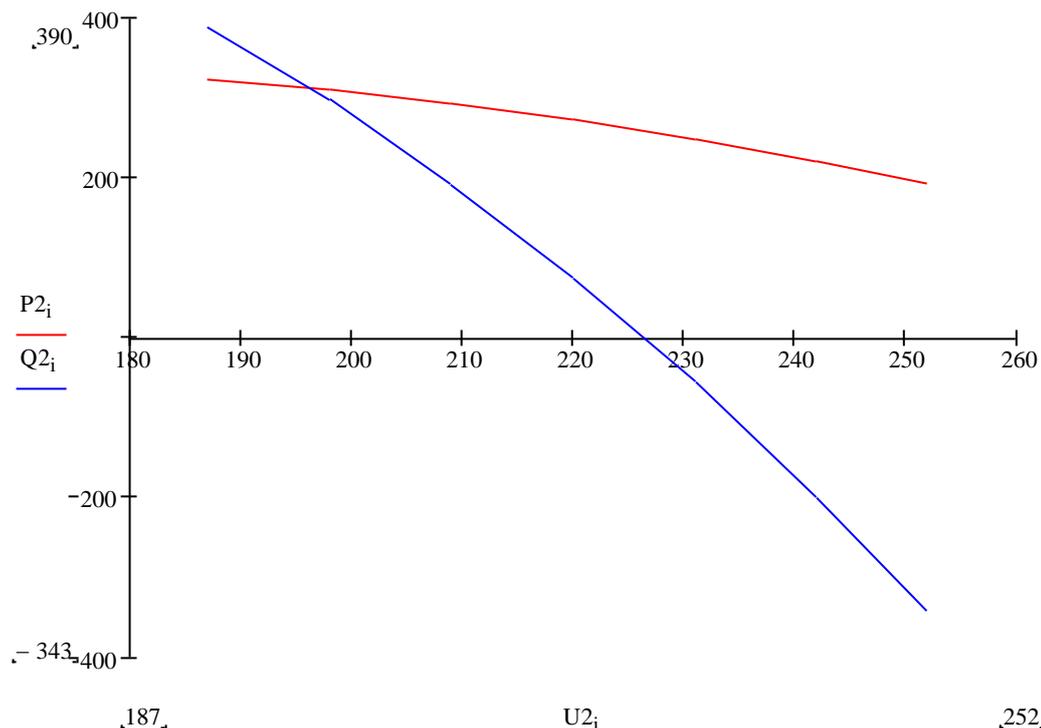


Рис. 6. Зависимость потоков мощности по ЛЭП от разности модулей напряжений по концам линии

Таблица 5

Номер опыта	Угол δ , град	Мощность P_2 , МВт	Мощность Q_2 , Мвар
1	-6	310,1	-2
2	-5	263,0	16,2
3	-4	215,7	33,5
4	-3	168,0	50,0
5	-2	120,1	65,7
6	-1	79,9	80,5
7	0	23,5	94,5
8	1	-25,2	107,6

По табличным значениям строим графики P_2 и Q_2 от величины угла между напряжениями по концам линии δ (рис. 7).

Выводы

1. Изменение разницы напряжений по концам линии в большей мере сказывается на изменении потока реактивной мощности, чем активной.

2. Изменение угла между напряжениями по концам линии сильно влияет на изменение потока активной мощности – с ростом угла по модулю активная мощность по линии увеличивается; в то же время реактивная мощность при этом в меньшей мере уменьшается.

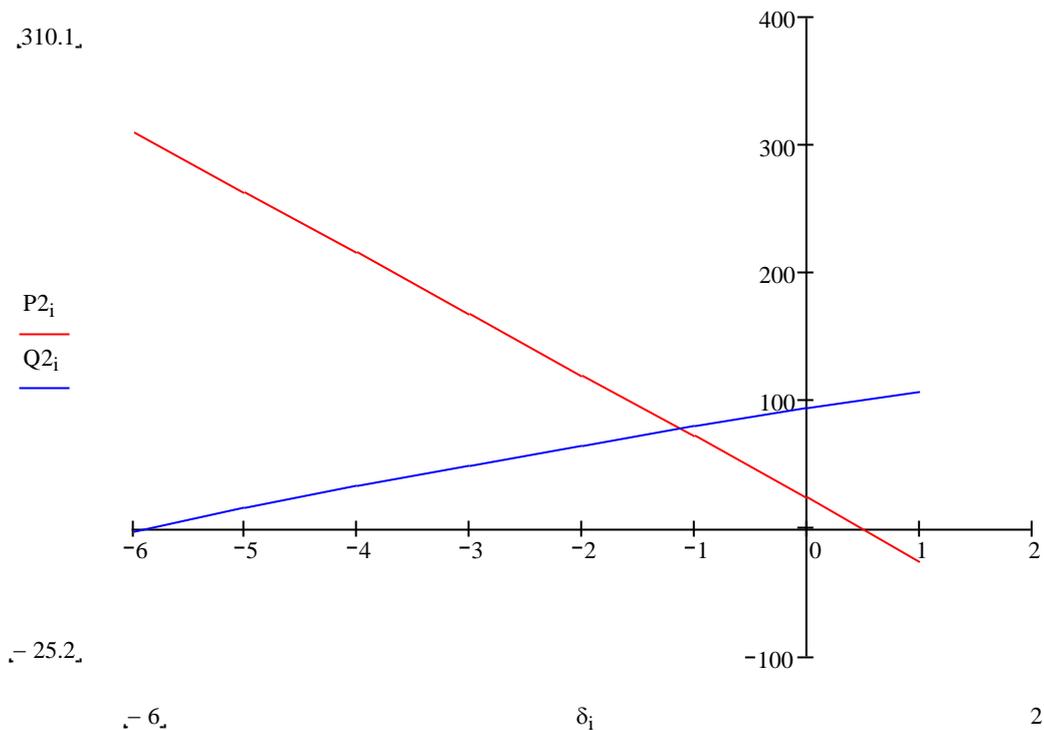


Рис. 7. Зависимость потоков мощности по ЛЭП от угла между напряжениями по концам линии

6. Построение области допустимых режимов ЛЭП

Максимально допустимая мощность по допустимому току нагрева проводов:

$$S_{\max} = 2\sqrt{3}I_{\max} U_{\text{ном}}, S_{\max} = 461,1 \text{ МВ}\cdot\text{А}.$$

Для построения границ допустимой области, определяемых предельными значениями напряжений в конце ЛЭП, зададим фиксированные значения напряжений по концам ЛЭП и, варьируя угол δ , получим точки соответствующих кривых:

Таблица 6

$$U_1 = 232; U_{2(\max)} = 252 \text{ кВ}.$$

Угол δ , град	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7	-8
P , МВт	-20,8	33,2	86,9	140,2	193,3	246	298,3	350,2
Q , Мвар	-271,2	-287,8	-305,3	-323,8	-343,2	-363,5	-384,8	-407,0

Таблица 7

$$U_1 = 232; U_{2(\min)} = 190 \text{ кВ}.$$

Угол δ , град	3	2	1	0	-1	-2	-3	-4
P , МВт	-5,1	36,4	77,7	118,8	159,7	200,4	240,9	2281,1
Q , Мвар	464,1	454,4	444,0	432,9	421,1	408,6	395,4	2381,4

По данным таблиц 6 и 7 строим граничные кривые по предельным значениям напряжения в конце ЛЭП.

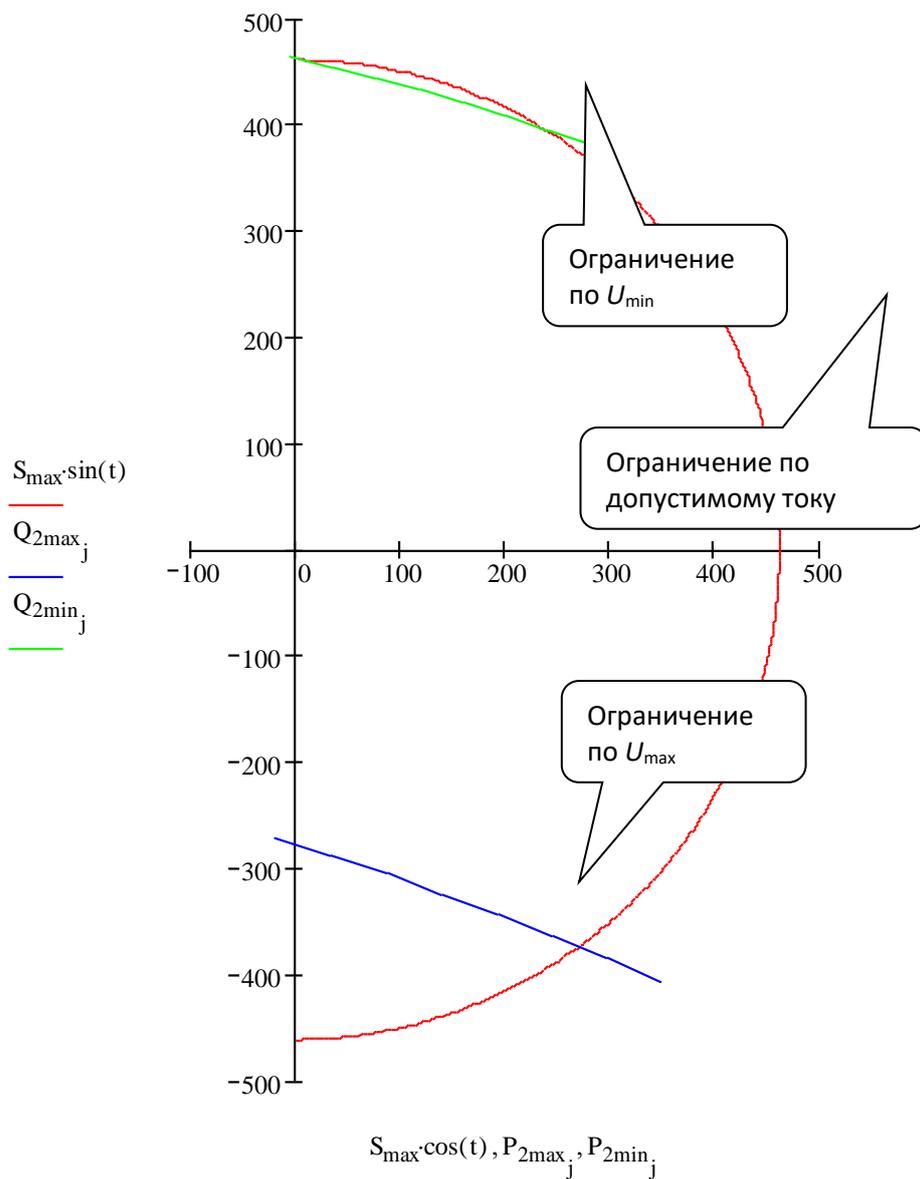


Рис. 8. Область допустимых режимов ЛЭП

Выводы

Область допустимых режимов для ЛЭП определяется в основном максимально допустимым током по проводам ЛЭП, а при большой компенсации реактивной мощности – максимальным возможным напряжением в конце ЛЭП